



**BAM**

Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

Dipl.-Ing. Dieter Lietze

**Grenze der Flammen-  
durchschlagsicherheit  
von Sperrschichten  
aus Sintermetall**

220

**Forschungsbericht**



Die Aufgaben der BAM stehen unter der Leitlinie:

## ***Sicherheit und Zuverlässigkeit in Chemie- und Materialtechnik***

Die BAM hat gemäß ihrem Gründungserlaß die Zweckbestimmung, die Entwicklung der deutschen Wirtschaft zu fördern. Sie ist im Aufgabenverbund „Material – Chemie – Umwelt – Sicherheit“ zuständig für:

- Hoheitliche Funktionen zur öffentlichen technischen Sicherheit, insbesondere im Gefahrstoff- und Gefahrgutrechtsbereich;
- Mitarbeit bei der Entwicklung entsprechender gesetzlicher Regelungen, z. B. bei der Festlegung von Sicherheitsstandards und Grenzwerten;
- Beratung der Bundesregierung, der Wirtschaft sowie der nationalen und internationalen Organisationen im Bereich der Materialtechnik und Chemie;
- Entwicklung und Bereitstellung von Referenzmaterialien und -verfahren, insbesondere der analytischen Chemie und der Prüftechnik;
- Unterstützung der Normung und anderer technischer Regeln für die Beurteilung von Stoffen, Materialien, Konstruktionen und Verfahren im Hinblick auf die Schadensfrüherkennung bzw. -vermeidung, den Umweltschutz und den Erhalt volkswirtschaftlicher Werte.

### **Die Tätigkeitsbereiche**

Das Tätigkeitsspektrum der BAM umfaßt die sich ergänzenden und aufeinander bezogenen Tätigkeiten:

- > Forschung und Entwicklung
- > Prüfung, Analyse und Zulassung
- > Beratung und Information.

### **Die nationale und internationale Zusammenarbeit**

Die Aufgaben der BAM für Technik, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft erfordern eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. Insofern arbeitet die Bundesanstalt mit Technologieinstitutionen des In- und Auslandes, insbesondere den nationalen Schwesterinstituten, eng zusammen. Sie berät Bundesministerien, Wirtschaftsverbände, Industrieunternehmen sowie Verbraucherorganisationen und unterstützt mit Fachgutachten Verwaltungsbehörden sowie Gerichte. Daneben ist sie in die internationale technische Zusammenarbeit eingebunden und im Bereich „Meßwesen – Normung – Prüftechnik – Qualitätssicherung“ (MNPQ) als nationale Institution für die Prüftechnik zuständig. Die Mitarbeiter der Bundesanstalt wirken in zahlreichen Fachgremien, gesetzlichen Körperschaften und normensetzenden Institutionen an der Aufstellung von technischen Regeln und Sicherheitsbestimmungen mit und vertreten die Bundesrepublik in nationalen und supranationalen Einrichtungen.

### **Der Status**

Die BAM ist als technisch-wissenschaftliche Bundesbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft Nachfolgeinstitution des 1870 gegründeten Staatlichen Materialprüfungsamtes sowie der 1920 gebildeten Chemisch-Technischen Reichsanstalt (CTR). Sie hat dementsprechend die Funktion einer materialtechnischen und chemisch-technischen Bundesanstalt. In ihr sind etwa 1700 Mitarbeiter, darunter mehr als 800 Wissenschaftler und Ingenieure, auf dem Stammgelände in Berlin-Lichterfelde sowie auf den Zweiggeländen in Berlin-Steglitz und Berlin-Adlershof tätig.

Dipl.-Ing. Dieter Lietze

**Grenze der Flammen-  
durchschlagsicherheit  
von Sperrschichten  
aus Sintermetall**

**Forschungsbericht 220**

Berlin, 1997

37 Seiten, 42 Abbildungen, 7 Tabellen

Herausgegeben von der  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

✉ 12200 Berlin  
Telefon (030) 81 04-0  
Telefax (030) 811 20 29

Copyright © 1997 by Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Herstellung und Verlag:  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Büromeister-Smidt-Str. 74-76,  
27568 Bremerhaven

✉ Postfach 10 11 10, 27511 Bremerhaven  
Telefon (0471) 945 44-0  
Telefax (0471) 945 44 77/88

ISSN 0938-5533  
ISBN 3-89429-778-6

## Zusammenfassung

In der Arbeit wird über die Ergebnisse umfangreicher Untersuchungen zur Bestimmung der Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Flammensperren mit einer Sperrschicht aus Sintermetall berichtet. Bestimmt wurde die Grenze der Flammendurchschlagsicherheit bei der Beanspruchung durch die einlaufende Reaktionsfront a) beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen, b) bei der Reaktion von Brenngas/Luft-Gemisch und c) bei der Reaktion von Brenngas/Sauerstoff-Gemisch sowie bei der Beanspruchung durch einen Nachbrand von strömendem Brenngas/Luft- und Brenngas/Sauerstoff-Gemisch an der Sperrschicht.

Auf der Basis der Ergebnisse dieser Untersuchungen kann die Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Flammensperren mit einer Sperrschicht aus Sintermetall abgeschätzt werden, und es können die Bedingungen angegeben werden, bei denen bei der Prüfung von Flammensperren mit dem niedrigsten Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit gerechnet werden muß, d. h. die Bedingungen, bei denen die Flammensperren auf Flammendurchschlagsicherheit geprüft werden müssen.

Auf der Grundlage einer Systemanalyse für die Absicherung von Entnahmestellen an Gasverteilungsleitungen beim Schweißen, Schneiden und bei verwandten Arbeitsverfahren werden Vorschläge für die Änderung der Vorschriften für die Prüfung der dort eingesetzten Sicherheitseinrichtungen mit einer Sintermetall-Flammensperre gemacht - Änderungsvorschläge, die bei der nächsten Revision der entsprechenden Technischen Regel für Acetylenanlagen und Calciumcarbidlager (TRAC), hier TRAC 207 „Sicherheitseinrichtungen“ bzw. der Normen DIN 8521, EN 730 und ISO 5175 berücksichtigt werden sollten.

Flammensperre, Sperrschicht, Sintermetall, Spaltweite, Deflagration, Detonation, Detonationsanlaufstrecke, Stoßwelle, Nachbrand, Nachströmsicherung

Über einzelne Teilaspekte der Untersuchungen ist bereits berichtet worden in

|                        |                                    |
|------------------------|------------------------------------|
| DIN-Mitteilungen       | Bd. 73 (1994), Nr. 1, S. 53 - 55   |
| Technische Überwachung | Bd. 34 (1993), Nr. 4, S. 164 - 167 |
| Technische Überwachung | Bd. 35 (1994), Nr. 2, S. 56 - 61   |
| Technische Überwachung | Bd. 35 (1994), Nr. 4, S. 164 - 171 |
| DIN-Mitteilungen       | Bd. 74 (1995), Nr. 4, S. 244 - 249 |

Eine englische Übersetzung der Arbeiten in Technische Überwachung Bd 35 (1994), Nr. 2 und in DIN-Mitteilungen Bd. 74 (1995), Nr. 4 ist in der Zeitschrift Loss Prevention in the Process Industries Vol. 8 (1995), Nr. 6, S.325 - 329 und S. 319 - 324 veröffentlicht worden.

## Summery

A report is given on the results of an extensive research work to determine the limit of safety against flame transmission for sintered metal flame arrester elements. We determined their limit of safety against flame transmission when stressed a) with the reaction front of a decomposition of high pressure acetylene, b) with a flashback in fuelgas-air mixture and c) with a flashback in fuelgas-oxygen mixture and when stressed with a stabilized burning of the flowing mixture of fuelgas and air and of fuelgas and oxygen at the sintered metal element.

On the basis of the results of these investigations the limit of safety against flame transmission for sintered metal flame arrester elements can be estimated and the conditions for testing can be specified.

A system analysis of the protection of gas outlets on gas distribution lines for welding, cutting and allied processes is made resulting in recommendations for necessary changes to the regulations for testing of the safety devices with sintered metal flame arrester elements - recommendations for changes, that should be made with the next revision of the corresponding technical regulations for acetylene installations and calciumcarbide stores (TRAC), here TRAC 207 „safety devices“ and the standards DIN 8521, EN 730 and ISO 5175.

Flame arrester, barrier layer, sintered metal, gap size, deflagration, detonation, predetonation distance, shock wave, stabilized burning, pressure-sensitive and temperature-sensitive cut-off valve.

Parts of these investigations had been published already in:

|                        |                                      |
|------------------------|--------------------------------------|
| DIN-Mitteilungen       | Vol. 73 (1994), No. 1, pp. 53 - 55   |
| Technische Überwachung | Vol. 34 (1993), No. 4, pp. 164 - 167 |
| Technische Überwachung | Vol. 35 (1994), No. 2, pp. 56 - 61   |
| Technische Überwachung | Vol. 35 (1994), No. 4, pp. 164 - 171 |
| DIN-Mitteilungen       | Vol. 74 (1995), No. 4, pp. 244 - 249 |

An english translation of the papers in Technische Überwachung Vol. 35 (1994), No. 2 and in DIN-Mitteilungen Vol. 74 (1995), No. 4 has been published in the Journal of Loss Prevention in the Process Industries Vol. 8 (1995), No. 6, pp. 325 - 329 (parts of the chapters 6 and 8 in this report) and pp. 319 - 324 (parts of the chapters 7 and 8 in this report).

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.    | Allgemeines zur Wirkungsweise von trockenen Flammensperren   | 7  |
| 2.    | Versuchs-Flammensperre bzw. - Zerfallssperre mit einer Sperrschicht aus Sintermetall   | 8  |
| 3.    | Durchflußmessungen mit den eingesetzten Sintermetalleinsätzen  | 9  |
| 3.1   | Durchflußkurven beim Prüfmedium Luft   | 9  |
| 3.2   | Durchflußkurven bei anderen Prüfmedien   | 10 |
| 3.2.1 | Versuche und Versuchsergebnisse  | 10 |
| 3.2.2 | Schlußfolgerungen  | 12 |
| 4.    | Flammendurchschlagsicherheit von Sintermetalleinsätzen beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen   | 12 |
| 4.1   | Allgemeine Vorbemerkungen  | 12 |
| 4.2   | Detonationsanlaufstrecken beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen  | 12 |
| 4.3   | Versuche und Versuchsergebnisse  | 13 |
| 4.4   | Schlußfolgerungen  | 15 |
| 5.    | Flammendurchschlagsicherheit von Sintermetalleinsätzen bei der Reaktion von Brenngas/Luft-Gemischen  | 15 |
| 5.1   | Allgemeine Vorbemerkungen  | 15 |
| 5.2   | Versuche und Versuchsergebnisse  | 15 |
| 5.3   | Zusammenfassung  | 21 |
| 6.    | Flammendurchschlagsicherheit von Sintermetalleinsätzen bei der Reaktion von Brenngas/Sauerstoff-Gemischen  | 21 |
| 6.1   | Versuche mit der Versuchsflammensperre DN 10   | 21 |
| 6.2   | Versuche mit dem mit einer Flammensperre ausgerüsteten Gasrücktrittsventil DN 20   | 24 |
| 6.3   | Zusammenfassung  | 27 |
| 7.    | Untersuchungen über die Dauer der Nachbrandsicherheit von Sperrschichten aus Sintermetall  | 28 |
| 7.1   | Angaben zum Versuchsaufbau und zur Versuchsdurchführung  | 28 |
| 7.2   | V Versuchsergebnisse und Diskussion der Ergebnisse   | 29 |
| 8.    | Anforderungen an Sicherungen zur Absicherung von Entnahmestellen an Gasverteilungsleitungen beim Schweißen, Schneiden und verwandten Arbeitsverfahren                                | 31 |
| 8.1   | Allgemeines zur Problemstellung  | 31 |
| 8.2   | Anforderungen an Gebrauchsstellenvorlagen aufgrund der Systemanalyse   | 31 |
| 8.3   | Anforderungen an Sicherheitseinrichtungen zur Absicherung von Gasmischern bzw. von Geräten zur elektrolytischen Zersetzung von Wasser als Gasquelle für Mikro-Löt- und Schweißgeräte | 32 |
| 8.4   | Schlußfolgerungen  | 33 |
| 8.4.1 | Für die Prüfung von Gebrauchsstellenvorlagen und Einzelflaschensicherungen beim Schweißen, Schneiden und bei verwandten Arbeitsverfahren   | 33 |
| 8.4.2 | Für die Prüfung von Gebrauchsstellenvorlagen, die zur Absicherung von Gasmischern eingesetzt werden sollen   | 33 |
| 8.5   | Schlußbemerkung zu den Prüfvorschriften für die Prüfung von trockenen Gebrauchsstellenvorlagen (safety devices)  | 34 |





# 1. Allgemeines zur Wirkungsweise von trockenen Flammensperren

Zur Absicherung von Anlagen oder Anlagenteilen, in denen – entweder verfahrensbedingt oder aber bei Störungen des Verfahrensablaufes – reaktionsfähige Gasphasen gehandhabt werden, verwendet man heute überwiegend sogenannte trockene Flammensperren. Trockene Flammensperren enthalten eine Sperrschicht, in der es durch Aufteilen der Reaktionsfront in eine Vielzahl von sehr kleinen Reaktionsfronten zum Abbruch der Reaktion kommen soll. Dadurch wird es möglich, beim ersten Einlaufen der Reaktionsfront einen sofortigen Flammendurchschlag durch die Sperre zu verhindern. Bei einer gegen das strömende Medium einlaufenden Reaktionsfront kann es nach dem Abbruch der Reaktion in der Sperrschicht jedoch durch erneutes Zünden des nachströmenden Frischgases zu einer an bzw. in der Sperrschicht stehenden Reaktionsfront, zu einem sogenannten Nachbrand kommen. Durch Aufheizen der Sperrschicht und des Sperrgehäuses kann dies dann u. U. nachträglich noch zu einem Flammendurchschlag durch die Sperre führen.

Damit es beim ersten Einlaufen der Reaktionsfront zu dem gewünschten Abbruch der Reaktion in der Sperrschicht kommt, darf die größte in dieser Sperrschicht vorhandene Spaltweite nicht größer sein als eine gewisse Grenzabmessung. Sie darf nicht größer sein als der sogenannte Löschabstand (quenching distance), bei dessen Unterschreiten ein Weiterlaufen der Reaktionsfront nicht mehr möglich ist.

Dieser Löschabstand ist im wesentlichen abhängig:

- von der Gasphase, d. h. vom Brenngas bzw. Brenngasgemisch und den jeweils möglichen Brenngas/Luft- bzw. Brenngas/Sauerstoff-Gemischzusammensetzungen,
- vom Zustand der Gasphase, d. h. vom Druck und von der Temperatur,
- vom Strömungszustand der Gasphase, d. h. von der Strömungsgeschwindigkeit und von der Turbulenz der Strömung im Löschspalt, wobei diese Turbulenz ganz wesentlich durch die Geometrie des Löschspaltes bestimmt wird,
- von der Geometrie des Löschspaltes, z. B. Verhältnis von Spaltlänge zu Spaltweite, Querschnittserweiterungen bzw. -verengungen, Änderungen der Strömungsrichtung u. s. w., d. h. Störstellen zur Turbulenzerzeugung (nach Literaturangaben [1] entspricht in seiner flammenlöschenden Wirkung einem Rundspalt mit konstantem Durchmesser  $d$  ein Parallelschalt mit konstanter Spaltweite  $s$  von  $s = 0,65 \times d$ ),
- von der Art der einlaufenden Reaktionsfront, d. h. ob sie als Deflagration oder Detonation in den Spalt eintritt. Bei einer Detonation kommt es durch die vor der Reaktionsfront einlaufende(n) Stoßwelle(n) zu zusätzlichen – allerdings nur sehr kurzzeitig wirksamen – Veränderungen des Zustandes der Gasphase im Löschspalt (Druck, Temperatur, Strömung, Schwingung von Gasäulen u. s. w.).

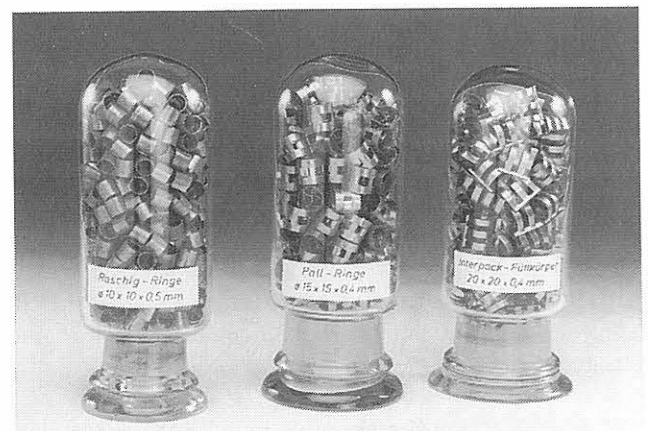
Entscheidend für die maximal zulässige Spaltweite in der Sperrschicht einer trockenen Flammensperre ist der Zustand der Gasphase hinsichtlich des Druckes, der Temperatur und der Strömung, der sich durch den Ablauf der Reaktion zum Zeitpunkt des Eintreffens der Reaktionsfront an der Sperrschicht in deren Spalte eingestellt hat, bzw. während eines Nachbrandes an der Sperrschicht in deren Spalte einstellen kann.

Bei einer als Detonation einlaufenden Reaktionsfront ist außerdem noch entscheidend, ob durch das Vorschalten eines „wirksamen“ Stoßfanges eine detonative Zündung der Gasphase an der Sperrschicht verhindert werden kann.

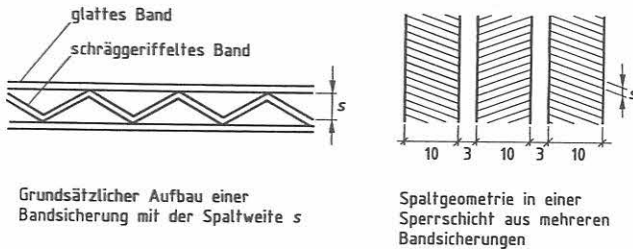
Mit relativ großen Spaltweiten für die Sperrschicht von trockenen Flammensperren kommt man aus, wenn es sich bei der reaktionsfähigen Gasphase um ein chemisch instabiles, zerfallsfähiges Gas bei niedrigen Anfangsdrücken handelt. Zum Abstoppen eines Acetylenzerfalls zum Beispiel genügen bei nicht zu hohen Anfangsdrücken – etwa beim maximal zulässigen Druck in Anlagen für sogenanntes „Mitteldruck-Acetylen“ von  $p_a = 2,5$  bar (1,5 bar Überdruck) – bereits Spaltweiten in der Größenordnung von einem Zentimeter. Hier haben sich bei Versuchen – und auch bei Unfällen mit einem Acetylenzerfall in technischen Anlagen – trockene Füllkörperstrecken mit Schüttungen aus Raschig-Ringen, Pall-Ringen oder Interpack-Füllkörpern als Sperrschicht für die einlaufende Zerfallsreaktion bewährt (2) (3). *Bild 1* zeigt Schaugläser mit Schüttungen aus diesen drei Füllkörperarten.

Beim maximal zulässigen Druck in Anlagen für sogenanntes „Hochdruck-Acetylen“ von  $p_a = 26$  bar, d. h. bei einem um den Faktor 10 höheren Anfangsdruck muß jedoch bereits eine um mehr als zwei Zehnerpotenzen kleinere Spaltweite für die Sperrschicht gewählt werden.

Handelt es sich bei der reaktionsfähigen Gasphase um Gemische aus brennbaren Gasen und Luft oder aus Dämpfen



*Bild 1*  
Schaugläser mit Schüttungen aus Raschig-Ringen, Pall-Ringen und Interpack-Füllkörpern



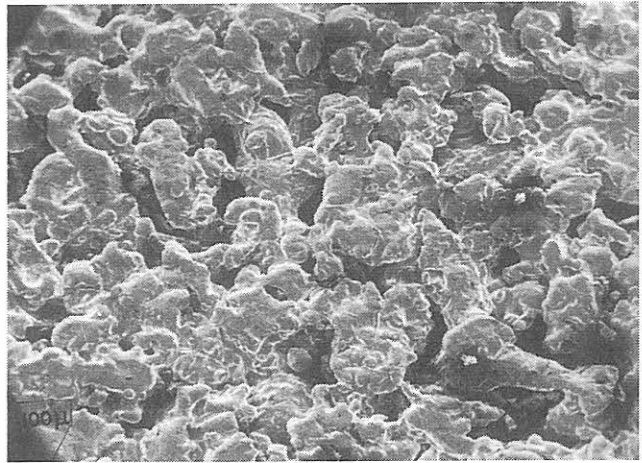
Grundsätzlicher Aufbau einer Bandsicherung mit der Spaltweite  $s$

Spaltgeometrie in einer Sperrschicht aus mehreren Bandsicherungen

**Bild 2**  
Prinzipieller Aufbau von Bandsicherungen und Spaltgeometrie in einer Sperrschicht aus mehreren Bandsicherungen

brennbarer Flüssigkeiten und Luft, so muß bei einem Anfangsdruck von einem Bar (Atmosphärendruck) die maximale Spaltweite in der Sperrschicht nach bisher vorliegenden Erfahrungen (4) (5) in der Größenordnung der sogenannten Normspaltweite  $s_{20}$  der jeweiligen Gemische (6) liegen. Sperrschichten mit Spaltweiten dieser Größenordnung lassen sich mit Hilfe sogenannter Bandsicherungen herstellen. **Bild 2** zeigt den prinzipiellen Aufbau von derartigen Bandsicherungen und die Spaltgeometrie in einer Sperrschicht aus mehreren Bandsicherungen.

Reaktionsfähige Gasphasen mit noch wesentlich größerem Flammendurchschlagsvermögen sind Brenngas/Sauerstoff-Gemische, für die die maximale Spaltweite in der Sperrschicht noch einmal um etwa zwei Zehnerpotenzen kleiner gewählt werden muß. Bei stöchiometrischem Acetylen/Sauerstoff-Gemisch und einem Anfangsdruck von  $p_a = 2,5$  bar zum Beispiel sind zum Abstoppen der einlaufenden Reaktionsfront Spaltweiten in der Größenordnung von nur wenigen Mikrometern erforderlich. Sperrschichten mit derart kleinen Spaltweiten lassen sich nur mit Hilfe sehr



**Bild 3**  
Spaltgeometrie in einer Sperrschicht aus Sintermetall der Qualität R 80 (Vergrößerung 50 : 1)

feinporiger Sintermetalle herstellen. **Bild 3** zeigt in einer Vergrößerung den Aufbau einer Sintermetallschicht aus Chrom-Nickel-Stahl und gibt einen Eindruck von der Geometrie der Spalte in der Sperrschicht.

Im Folgenden soll über die Ergebnisse von umfangreichen Untersuchungen zur Bestimmung der Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Flammensperren mit einer Sperrschicht aus Sintermetall

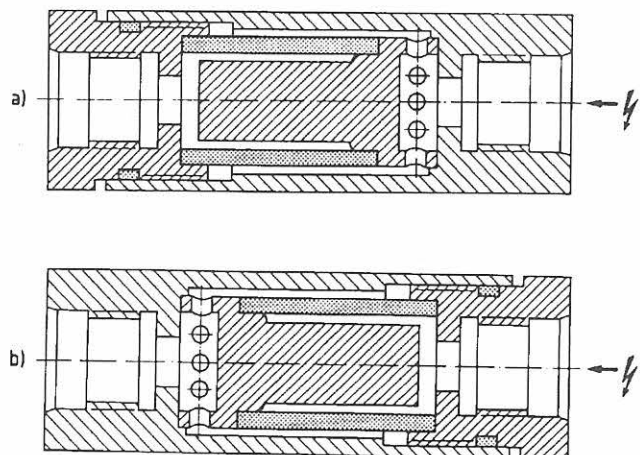
- a) beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen,
  - b) bei der Reaktion von Brenngas/Luft-Gemischen und
  - c) bei der Reaktion von Brenngas/Sauerstoff-Gemischen
- berichtet werden.

## 2. Versuchs-Flammensperre bzw. -Zerfallssperre mit einer Sperrschicht aus Sintermetall

Für die Durchführung von Versuchen wurde zunächst die auf dem **Bild 4** dargestellte Versuchs-Flammensperre mit der Anschlußnennweite DN 10 eingesetzt.

In das Sperrengehäuse konnten Sintermetalleinsätze mit unterschiedlicher Porosität mit den Abmessungen  $\varnothing 27 \times \varnothing 20 \times 40$  mm eingesetzt werden. Die Gehäuseverschraubung auf der einen Anschlußseite hatte zur Aufnahme des Einsatzes eine 5 mm tiefe Ausdrehung, davon 3 mm mit einem Kegel 1:10 und 2 mm mit einer Fase von  $30^\circ$ . Auf der anderen Anschlußseite hatte das Einbauteil mit den Querbohrungen zur Umlenkung des Gasstromes einen 5 mm breiten Ansatz, wieder mit einem 3 mm langen Kegel 1:10 und einer 2 mm breiten Fase von  $30^\circ$  als Zentrierhilfe beim Zusammenbau.

Die kegelförmigen Flächen waren so dimensioniert, daß der Sintermetalleinsatz beim Zusammenbau auf der einen Anschlußseite von außen zusammengepreßt und auf der anderen Anschlußseite von innen aufgeweitet wurde. Da-



**Bild 4**  
Versuchsflammensperre (-zerfallssperre) DN 10 mit Beanspruchung des Sintermetalleinsatzes durch die einlaufende Reaktionsfront

- a) von außen
- b) von innen

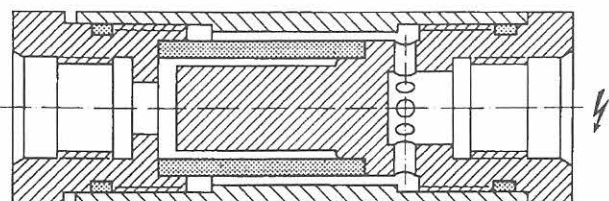


Bild 5  
Versuchsflammsperre (-zerfallssperre) DN 10 in der geänderten Ausführung

durch wurde auf beiden Einspannseiten über die 3 mm breite Kegelfläche ein flammendurchschlagsicherer Kontakt zwischen den Bauteilen erzeugt. Ein Flammendurchschlag konnte nur durch die Poren des Sintermetalleinsatzes erfolgen oder durch nachträglich gebildete Risse, wenn infolge zu starker Belastung der Sintermetalleinsatz mechanisch beschädigt oder zerstört wird.

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen (siehe Abschnitt 4.3) führten zu einer Änderung an der Konstruktion der Versuchsflammsperre. Auf dem Bild 5 ist diese konstruktiv geänderte Ausführung der Versuchsflammsperre skizziert. In dieser geänderten Ausführung kann der Sintermetalleinsatz nicht mehr durch den bei einer als Detonation einlaufenden Reaktionsfront auftretenden Stoß in Längsrichtung gestaucht werden.

Für die Untersuchungen konnten Sintermetalleinsätze der Qualitäten R80, R50, R30, R20, R10 und R3 eingesetzt werden. In dieser Qualitätsbezeichnung steht der Buchstabe R für den Werkstoff Chrom-Nickel-Stahl (Remanit) und der Zahlenwert für die maximale Spaltweite in Mikrometern, in den Firmenprospekten auch Filterfeinheit genannt. Mit zunehmender Porenweite nimmt die Festigkeit des Sinterwerkstoffes ab.

### 3. Durchflußmessungen mit den eingesetzten Sintermetalleinsätzen

#### 3.1 Durchflußkurven beim Prüfmedium Luft

In dem Diagramm auf Bild 7 ist für die Versuchsflammsperre nach Bild 5 der mit dem Prüfmedium Luft bestimmte Volumenstrom  $\dot{V}$ , in Abhängigkeit vom Vordruck  $p_v$  bei freiem Abströmen in die Atmosphäre aufgetragen. Parameter ist die Qualität bzw. Filterfeinheit des Materials der Sintermetalleinsätze.

Die Versuchsflammsperre war so an die Meßeinrichtung angeschlossen, daß der Sintermetalleinsatz von innen nach außen von dem Prüfmedium durchströmt worden ist.

In dem Diagramm auf Bild 8 ist für die Versuchsflammsperre nach Bild 5 mit einem Sintermetalleinsatz der Qua-

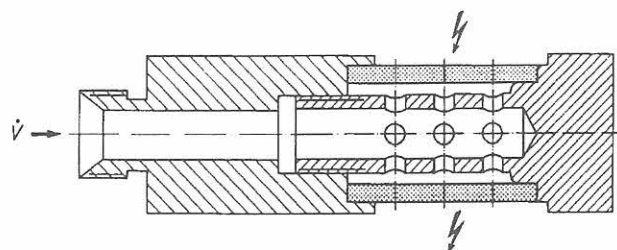


Bild 6  
Verspannung des Sintermetalleinsatzes bei den Versuchen zur Bestimmung der Dauer der Nachbrandsicherheit

Die in den Diagrammen auf den Abbildungen bei der Qualitätsbezeichnung angegebene Buchstabenfolge SIKA kennzeichnet den Hersteller der Sintermetalleinsätze.

Weitere Versuche wurden auch noch mit einem durch eine Flammsperre geschützten Gasrücktrittsventil ausgeführt. In das Gerät mit der Anschlußnennweite DN 20 konnten als Flammsperre Sintermetalleinsätze mit den Abmessungen  $\varnothing 50 \times \varnothing 40 \times 50$  mm der Qualität R50, R30 und R20 eingesetzt werden. Bei den Versuchen mit diesem Gerät ist das Gasrücktrittsventil in Offenstellung blockiert worden.

Bei den Versuchen zur Bestimmung der Dauer der Nachbrandsicherheit von Sperrschichten aus Sintermetall wurde neben der Versuchsflammsperre DN 10 und zwei handelsüblichen, sogenannten Gebrauchsstellenvorlagen (Gerät mit einem Gasrücktrittsventil, einer Flammsperre und einer Nachströmsperre) auch noch die auf dem Bild 6 skizzierte Versuchsflammsperre eingesetzt. Durch diese Art der Verspannung zwischen zwei Bauteilen ohne ein den Sintermetalleinsatz umschließendes Gehäuse konnte die durch den Einsatz strömende Gasphase direkt an der Sintermetalloberfläche gezündet werden.

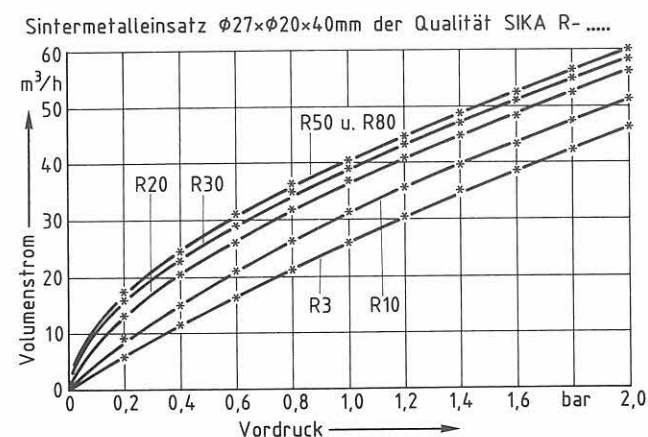


Bild 7  
Volumenstrom in Abhängigkeit vom Vordruck bei freiem Abströmen in die Atmosphäre für die Versuchsflammsperre DN 10 mit Sintermetalleinsätzen unterschiedlicher Qualität. Prüfmedium: Luft

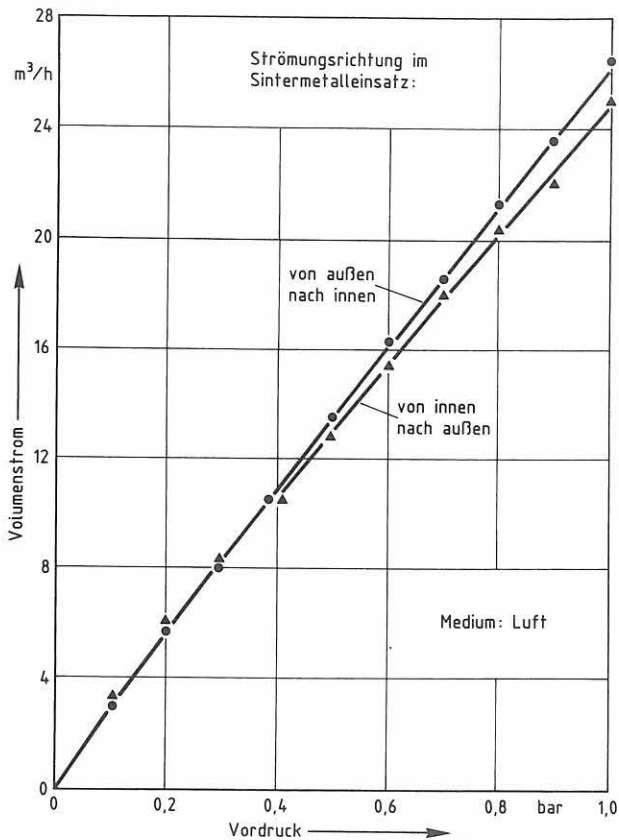


Bild 8  
Volumenstrom in Abhängigkeit vom Vordruck bei Variation der Strömungsrichtung in dem Sintermetalleinsatz

lität R 3 der Volumenstrom  $\dot{V}$  in Abhängigkeit vom Vordruck  $p_v$  angegeben, wenn der Sintermetalleinsatz einmal von innen nach außen und dann von außen nach innen durchströmt wird. Bei größeren Druckdifferenzen  $\Delta p = p_v$  ist der Druckverlust (Strömungswiderstand) etwas größer bzw. der Volumenstrom etwas kleiner (ca. 5 %), wenn der Sintermetalleinsatz von innen nach außen durchströmt wird.

Im Norm-Entwurf DIN 8521 „Einrichtungen für Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren; Sicherheitseinrichtungen für Brenngase und Sauerstoff oder Druckluft; Allgemeine Festlegungen, Anforderungen und Prüfungen (Vorschlag für eine Europäische Norm)“ (April 1992) bzw. in der gerade veröffentlichten Europäischen Norm EN 730 „Equipment used in gas welding, cutting and allied processes; Safety devices for fuel gases and oxygen or compressed air; General specifications, requirements and tests“ wird unter Punkt 6.4 „Prüfgase“ bzw. „test gases“ gefordert, daß die Durchflußmessungen der Flammensperre mit dem Gas durchzuführen sind, für das sie vorgesehen sind.

Beim Einsatz von brennbaren Gasen als Prüfmedium für die Durchflußmessung ergeben sich sicherheitstechnische Probleme bei der Versuchsdurchführung. An der Öffnung des Systems zur Atmosphäre muß mit der Bildung einer größeren Menge von reaktionsfähigem Brenngas/Luft-Gemisch gerechnet werden. Es stellt sich daher die Frage, wie der mit Luft bzw. Stickstoff gemessene Gasdurchfluß auf andere Gase umgerechnet werden muß, damit die Durchflußmessung weiterhin – wie bisher – mit dem Prüfmedium Luft bzw. Stickstoff gefahrlos durchgeführt werden kann.

Von den Herstellern der Sicherheitseinrichtungen wird bisher so verfahren, daß für die Umrechnung des mit Luft gemessenen Gasdurchflusses (Volumenstromes) auf andere Gase ein Faktor angegeben wird, der dem Verhältnis der Volumenströme entspricht, daß sich beim Ausströmen der Medien aus einer Behälteröffnung ergibt.

Beim Ausströmen aus einer Behälteröffnung verhalten sich bei gleichem Überdruck (Vordruck) die Ausströmgeschwindigkeiten  $w_1$  und  $w_2$  und damit die Volumenströme  $\dot{V}_1 = w_1 F$  und  $\dot{V}_2 = w_2 F$  zweier Gase mit den Dichten  $\rho_1$  und  $\rho_2$  umgekehrt wie die Wurzeln der Dichten, d. h. es gilt  $\dot{V}_1 / \dot{V}_2 = \sqrt{\rho_2 / \rho_1}$ . Die Benutzung dieses Umrechnungsfaktors wäre dann zulässig, wenn sich die Durchflußmengen für verschiedene Gase beim Ausströmen über die Sicherheitseinrichtung mit der Sperrschicht aus Sintermetall im gleichen Verhältnis ändern würden wie beim Ausströmen der Gase aus einer Behälteröffnung.

## 3.2 Durchflußkurven bei anderen Prüfmedien

### 3.2.1 Versuche und Versuchsergebnisse

Mit Hilfe des in Bild 9 skizzierten Versuchsaufbaus sind Durchflußmessungen an zwei Sicherheitseinrichtungen mit verschiedenen Gasen (Luft, Sauerstoff, mehrere Brenngase) ausgeführt worden. Bei der einen Sicherheitseinrichtung handelte es sich wieder um die Versuchsflammensperre nach Bild 5 mit einem Sintermetalleinsatz der Qualität R3 und den Abmessungen  $\varnothing 27 \times \varnothing 20 \times 40$  mm. Die zweite Sicherheitseinrichtung war eine sogenannte Gebrauchstellenvorlage mit einem Gasrücktrittsventil, einer Flammensperre aus Sintermetall der Qualität R3 mit den Abmessungen  $\varnothing 17,5 \times \varnothing 10,5 \times 30$  mm und einer Nachströmsperre.

Durch die Versuche konnte für die beiden Geräte der Volumenstrom in Abhängigkeit vom Vordruck bei freiem Abströmen gegen die Atmosphäre für die eingesetzten Brenngase, Luft und Sauerstoff bestimmt werden. Die ausströmenden Brenngase wurden abgefackelt. Die Zündung

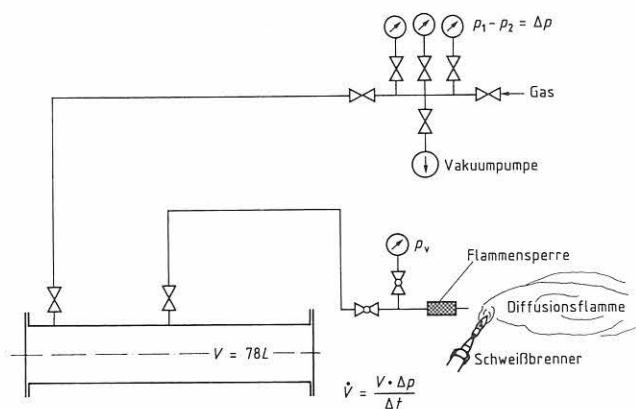
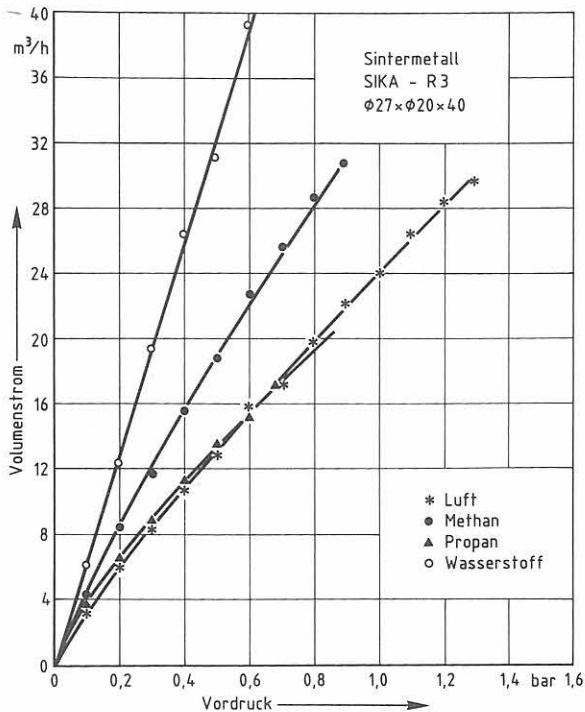


Bild 9  
Schemazeichnung vom Versuchsaufbau für die Durchflußmessungen mit Variation der Gasphase



**Bild 10**  
Volumenstrom in Abhängigkeit vom Vordruck bei freiem Abströmen in die Atmosphäre, ermittelt bei Versuchen mit der Versuchsflammsperre nach Bild 5

erfolgte durch einen hinter der Ausströmöffnung angeordneten Schweißbrenner. Der Volumenstrom  $\dot{V}$  wurde aus dem Behältervolumen  $V$ , dem Druckabfall im Behälter  $\Delta p$  und der Ausströmzeit  $\Delta t$  berechnet. Während der Ausströmzeit wurde der Vordruck konstant gehalten.

Die Versuchsergebnisse sind in den Diagrammen auf den Bildern 10 und 11 zusammengestellt. Aufgetragen ist der Volumenstrom in Abhängigkeit vom Vordruck mit den eingesetzten Gasen als Parameter.

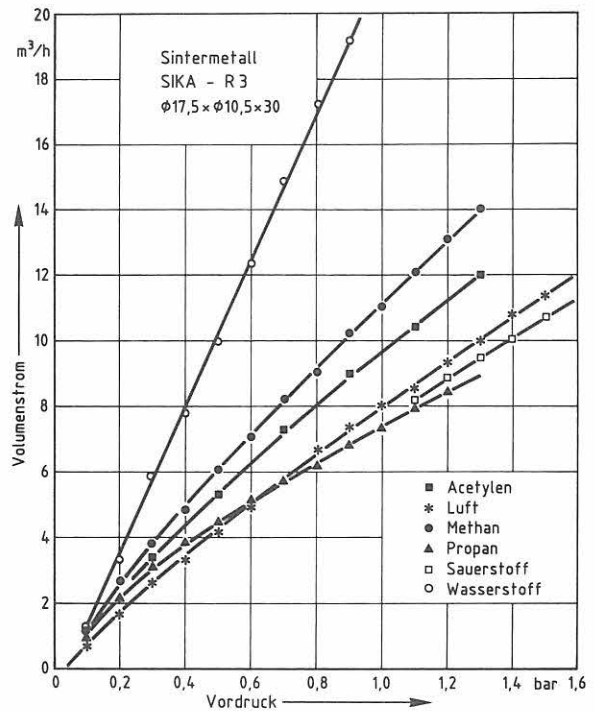
In der Tabelle 1 sind für die eingesetzten Gase die Dichte, die dynamische und kinematische Zähigkeit, der Kehrwert der kinematischen Zähigkeit als Vergleichswert für die Reynoldszahlen bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit

**Tabelle 1**  
Verhältnis  $\dot{V}_{\text{Gas}} / \dot{V}_{\text{Luft}}$  nach den Kurven  $\dot{V} = f(p_v)$  für verschiedene Gase beim Ausströmen über einen Sintermetalleinsatz (Gebrauchsstellenvorlage)

| Brenngas    | Dichte<br>$\rho$<br>kg/m <sup>3</sup> | dyn. Zähigkeit<br>$\eta$<br>g cm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> x 10 <sup>-6</sup> | kin. Zähigkeit<br>$\nu$<br>cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> x 10 <sup>-3</sup> | $l/\nu$<br>$\sim Re = w d/\nu$<br>s cm <sup>-2</sup> | $\dot{V}_{\text{Gas}} / \dot{V}_{\text{Luft}}$<br>$\sqrt{\rho_L / \rho_{\text{Gas}}}$ a) | $\dot{V}_{\text{Gas}} / \dot{V}_{\text{Luft}}$<br>gemessen |
|-------------|---------------------------------------|---|---|--|--|--|
| Luft        | 1,2930                                | 182,0   | 151   | 6,62   | 1  | 1  |
| Wasserstoff | 0,08989                               | 87,6  | 1057,8  | 0,95   | 3,79   | 2,50   |
| Methan      | 0,7168                                | 109,4   | 161,7   | 6,18   | 1,34   | 1,40   |
| Propan      | 2,0096                                | 80,6  | 42,7  | 23,42  | 0,80   | > 1,0 bis 0,90 *)  |
| Acetylen    | 1,1717                                | 102,0   | 93,4  | 10,71  | 1,05   | 1,20   |
| Sauerstoff  | 1,42895                               | 203,0   | 152,5   | 6,56   | 0,95   | 0,95   |

\*) Verhältnis  $\dot{V}_{\text{Gas}} / \dot{V}_{\text{Luft}}$  ändert sich mit dem Vordruck

a) Verhältnis  $\dot{V}_{\text{Gas}} / \dot{V}_{\text{Luft}}$  beim Ausströmen aus einer Öffnung



**Bild 11**  
Volumenstrom in Abhängigkeit vom Vordruck bei freiem Abströmen in die Atmosphäre, ermittelt bei Versuchen mit einer handelsüblichen Gebrauchsstellenvorlage

(Volumenstrom durch freien Strömungsquerschnitt) und Spaltweite sowie zwei Verhältnisse Volumenstrom Gas zu Volumenstrom Luft angegeben. Einmal das Verhältnis  $\dot{V}_{\text{Gas}} / \dot{V}_{\text{Luft}}$ , daß man beim Ausströmen der Medien aus einer Öffnung bei gleichem Vordruck erhalten würde, zum anderen das Verhältnis  $\sqrt{\rho_L / \rho_{\text{Gas}}}$ , daß sich beim Ausströmen der Medien über einen Sintermetalleinsatz bzw. über ein Gasrücktrittsventil und einen Sintermetalleinsatz bei gleichem Vordruck aus den Meßwerten als Mittelwert ergeben hat. Wie man sieht, ergeben sich hier unterschiedliche Werte für das Verhältnis  $\dot{V}_{\text{Gas}} / \dot{V}_{\text{Luft}}$ .

Mit Hilfe der in der letzten Spalte der Tabelle angegebenen Werte  $\sqrt{\rho_L / \rho_{\text{Gas}}}$  können die bei Durchflußmessungen mit Luft ermittelten Werte auf den Durchfluß bei dem je-

weils anderen Gas umgerechnet werden. Genaugenommen ist dieser Umrechnungsfaktor nach den Meßergebnissen auch noch geringfügig vom Vordruck abhängig.

Bei den Versuchen mit der Versuchsflammsperre und größeren Volumenströmen ist es hinter der Ausströmöffnung zu einer etwa 3 m langen Diffusionsflamme gekommen. Insbesondere bei den Brenngasen Propan und Acetylen wurde eine starke Belastung der Umgebung (Prüfer) durch Wärmestrahlung aus der Diffusionsflamme beobachtet. Beim Acetylen kommt es zusätzlich zu einer starken Rußentwicklung durch die Diffusionsflamme und damit zu einer stärkeren Rußverschmutzung der Umgebung.

### 3.2.2 Schlußfolgerung

Bei der Durchflußmessung an Flammensperren mit brennbaren Gasen, wie sie neuerdings in der Europäischen Norm EN 760 gefordert wird, ergeben sich größere sicherheitstechnische Probleme. Deshalb sind vom Autor mit mehreren Brenngasen, Luft und Sauerstoff Durchflußmessungen an Flammensperren mit einer Sperrschicht aus Sintermetall ausgeführt worden, um die Umrechnungsfaktoren zu be-

Tabelle 2

Faktoren für die Umrechnung des mit Luft gemessenen Volumensstromes  $\dot{V}_{Luft}$  auf den Volumenstrom  $\dot{V}_{Gas}$  bei anderen Gasen

| Brenngas    | $\dot{V}_{Gas} / \dot{V}_{Luft}$ |
|-------------|----------------------------------|
| Luft        | 1                                |
| Wasserstoff | 2,50                             |
| Methan      | 1,40                             |
| Propan      | > 1,0 bis 0,90 *)                |
| Acetylen    | 1,20                             |
| Sauerstoff  | 0,95                             |

\*) Der Wert 1,0 ergibt sich beim Vordruck  $p_v = 0,7$  bar. Mit steigendem Vordruck nimmt  $\dot{V}_{Propan} / \dot{V}_{Luft}$  dann weiter ab.

stimmen, mit denen aus dem mit Luft gemessenen Durchfluß der Durchfluß bei anderen Gasen berechnet werden kann.

Die dabei ermittelten Umrechnungsfaktoren sind in der Tabelle 2 zusammengestellt. Durch weitere Versuche mit anderen Brenngasen kann die Tabelle jederzeit ergänzt werden.

## 4. Flammendurchschlagsicherheit von Sintermetalleinsätzen beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen

### 4.1 Allgemeine Vorbemerkungen

Acetylen mit der Summenformel  $C_2H_2$  ist ein Brenngas, daß wegen der Dreifachbindung zwischen den Kohlenstoffatomen im Molekül instabil und dadurch zerfallsfähig ist. Ein Brenngas also, in dem auch bei Abwesenheit von Luft bzw. Sauerstoff eine fortschreitende Reaktion eingeleitet werden kann, wenn die dazu erforderliche Energie in das System eingebracht wird.

Um auch derartige reaktionsfähige Gasphasen sicher handhaben zu können, müssen konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen getroffen werden. Die Handhabung muß so erfolgen, daß mögliche Zündquellen nicht wirksam werden können. Da dies erfahrungsgemäß aber nicht immer möglich ist, müssen die Anlagen außerdem druckfest gegen die bei einem Acetylenzerfall auftretenden Beanspruchungen ausgelegt werden.

Weiterhin müssen Anlagenteile durch den Einbau von Zerfallssperren vor dem Einlaufen einer Reaktionsfront abgesichert werden, damit im Schadensfall der Schaden auf einen kleineren Teil der Anlage begrenzt wird.

Im Hochdruckteil von Acetylenanlagen wird das Acetylen unter Bedingungen gehandhabt, bei denen im Falle einer Zündung eine solche Zerfallsreaktion auch bei kleinen

Rohr- bzw. Schlauchdurchmessern bereits nach relativ kurzen Laufwegen für die Reaktionsfront einen detonativen Verlauf annehmen kann.

In den Technischen Regeln für Acetylenanlagen und Calciumcarbidlager (TRAC) wird der maximale Acetylen- druck für den Hochdruckteil von Acetylenflaschenbatterien bzw. Batterien aus Acetylenbündeln auf 26 bar (25 bar Überdruck) begrenzt und für den Hochdruckteil von Acetylenfüllanlagen auf 28,5 bar (Abschaltdruck für den Acetylenverdichter). Der Rohr- bzw. Schlauchdurchmesser darf maximal 25 mm betragen.

### 4.2 Detonationsanlaufstrecken beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen

In der Tabelle 3 sind die bei Versuchen mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Rohrleitungen mit glatter Innenoberfläche ermittelten Detonationsanlaufstrecken zusammengestellt. Die anderen Randbedingungen waren eine bei der Zündung ruhende Gasphase und Zündung durch einen durchschmelzenden Metalldraht.

Die Detonationsanlaufstrecke  $L_A$  wurde bei Versuchen ermittelt, bei denen die Länge der Rohrleitung  $L$  größer war als die Länge der Detonationsanlaufstrecke  $L_A$ , d. h.  $L_A$  für

Tabelle 3

Detonationsanlaufstrecken beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen und den Bedingungen: Rohrleitung mit glatter Oberfläche, bei der Zündung ruhende Gashase, durchschmelzender Metalldraht als Zündquelle.

$L_{krit} = L_A$  für  $L/L_A = 1$  ( $L$  = Länge der Rohrleitung)

| Rohrinnendurchmesser<br>$d_i$<br>mm | Anfangsdruck<br>$p_a$<br>bar | Detonationsanlaufstrecke |                  | Verhältnis<br>$\frac{L_A / d_i}{L_{krit} / d_i}$<br>— |
|-------------------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------|---|
|                                     |                              | $L_A$<br>mm              | $L_{krit}$<br>mm |   |
| 20                                  | 26                           | 1900                     | —                | 95  |
| 20                                  | 26                           | —                        | 1670             | 84  |
| 20                                  | 21                           | —                        | 2100             | 105   |
| 15                                  | 26                           | —                        | 1560             | 104   |
| 10                                  | 30                           | —                        | 1180             | 118   |
| 10                                  | 10                           | —                        | 1920             | 192   |

$L/L_A > 1$ . Die als kritische Rohrlänge  $L_{krit}$  bezeichnete Detonationsanlaufstrecke wurde bei Versuchen ermittelt, bei denen die Länge der Rohrleitung  $L$  genauso groß war wie die Länge der Detonationsanlaufstrecke  $L_A$ , d. h.  $L_{krit} = L_A$ , wenn  $L/L_A = 1$ . Die nach dieser Methode ermittelte Detonationsanlaufstrecke wird hier als kritische Rohrlänge  $L_{krit}$  bezeichnet, weil bei  $L = L_{krit}$  die höchsten Drucksteigerungen durch die Reaktion und damit auch Beanspruchungen an der Rohrleitung (Flammensperre) auftreten, die bei Gasreaktionen überhaupt möglich sind [7].

Auf dem Bild 12 sind beispielhaft die Ergebnisse der Versuche zusammengestellt, mit deren Hilfe die kritische Rohrlänge  $L_{krit}$  für die Bedingungen: 20 mm Innendurchmesser, 26 bar Anfangsdruck, glatte Rohroberfläche, ruhende Gasphase, durchschmelzender Metalldraht als Zündquelle ermittelt worden ist. Bei diesen Versuchen ist nur die Länge der Rohrleitung, d. h. der Abstand zwischen dem Zündort und dem Rohrende variiert worden. Der Berstdruck für das Rohr  $\varnothing 30 \times 5$  mm aus dem Werkstoff St 35 GBK betrug etwa 2000 bar.

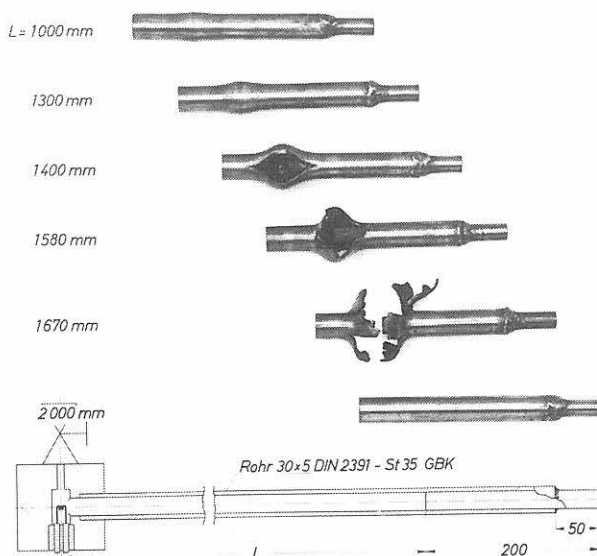


Bild 12  
Verformung des Rohrendes bei Versuchen mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen bei 26 bar Anfangsdruck in Rohren  $\varnothing 30 \times 5$  mm aus St 35 GBK und Variation der Rohrlänge  
Berstdruck des Rohres beträgt etwa 2000 bar

### 4.3 Versuche und Versuchsergebnisse

Der Aufbau für die Versuche mit der Versuchs-Zerfallsperre DN 10 ist auf dem Bild 13 skizziert. Der Zerfallsperre war eine  $L = 5$  m bzw. 1,2 m lange Rohrleitung DN 10 vorgeschaltet und eine ca. 0,3 m lange Rohrleitung DN 10 nachgeschaltet. Die Rohrleitung mit der eingebauten Zerfallssperre wurde evakuiert und anschließend mit Acetylen bis zum jeweils gewählten Versuchsdruck gefüllt. Die Einleitung der Zerfallsreaktion erfolgte am Anfang der vorgeschalteten Rohrleitung durch Durchschmelzen eines Metalldrahtes. Ein Flammendurchschlag wurde mit Hilfe eines Thermoelementes registriert, mit dem die bei einem Acetylenzerfall in der nachgeschalteten Rohrleitung bewirkte Erwärmung der Rohrwand gemessen wurde. Außerdem wurde bei einem Acetylenzerfall in der nachgeschalteten Rohrleitung die am Rohrende montierte Berstscheibe aus 0,3 mm dickem Aluminiumblech entweder stark verformt oder aber ausgestanzt.

Bei einem Laufweg von fünf Meter Länge für die Reaktionsfront hat man bei den vorliegenden Bedingungen (Druck, Rohrdurchmesser usw.) an der Sperre den Fall der Belastung durch eine stabile Detonation bei nahezu stationären Bedingungen vorliegen.

Bei einem Laufweg von nur 1,2 m Länge dagegen ist die Sperre etwa an der Stelle eingebaut, an der der Umschlag der Reaktion von der Form der Deflagration zur Detonation erfolgt (siehe Tabelle 3).

Es wurden Versuche ausgeführt, bei denen der Sintermetalleinsatz in der Sperre von außen und bei denen er von innen durch die einlaufende Reaktionsfront beansprucht worden ist. Eingesetzt wurden Sintermetalleinsätze der Qualitäten

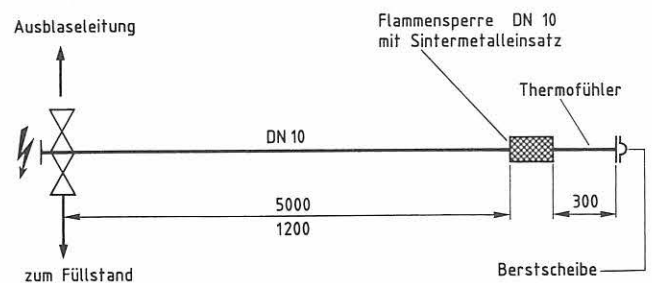


Bild 13  
Aufbau für die Versuche mit der Versuchszerfallssperre DN 10

Tabelle 4

Verhalten einer Versuchs-Zerfallssperre in der Ausführung nach Bild 4 mit Sintermetalleinsätzen unterschiedlicher Qualität beim Einlaufen eines Acetylenzerfalls aus einer Rohrleitung DN 10 bei einem Anfangsdruck von 28,5 bar

| Versuch Nr. | Länge der Vorleitung mm | Sintermetallqualität | Beanspruchung des Einsatzes von | Ergebnis und Bemerkungen  |
|-------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 1           | 5000                    | R 30                 | außen                           | kein Flammendurchschlag/a |
| 2           | 5000                    | R 10                 | außen                           | kein Flammendurchschlag/a |
| 3           | 5000                    | R 80                 | außen                           | Flammendurchschlag/ a     |
| 4           | 5000                    | R 80                 | außen                           | Flammendurchschlag/ a     |
| 5           | 5000                    | R 30                 | außen                           | kein Flammendurchschlag/a |
| 6           | 1200*)                  | R 30                 | außen                           | kein Flammendurchschlag/a |
| 7           | 1200*)                  | R 80                 | außen                           | Flammendurchschlag/ b     |
| 8           | 1200*)                  | R 30                 | außen                           | kein Flammendurchschlag/a |
| 9           | 1200*)                  | R 10                 | innen                           | Flammendurchschlag/ c     |
| 10          | 5000                    | R 10                 | innen                           | Flammendurchschlag/ c     |

\*) Länge der Vorleitung L entspricht der Länge der Detonationslaufstrecke  $L_A$  beim Fall  $L/L_A = 1$  und den hier vorliegenden Bedingungen (Druck, Rohrdurchmesser, Volumenstrom  $\dot{V} = 0 \text{ m}^3/\text{h}$ , glatte Rohrleitung usw.)

- a) Durch den Stoß der Detonationsfront wird der Einsatz in der Länge um ca. 3 mm gestaucht. Außerdem wird der Einsatz durch den Explosionsdruck im Ringraum zwischen Gehäusewand und Sintermetalleinsatz im Durchmesser um bis zu 1,5 mm zusammengedrückt.
- b) Wie a, zusätzlich aber einmal senkrecht zur Achse durchgerissen.
- c) Einsatz durch den Explosionsdruck bis zum Gehäuseinnendurchmesser aufgeweitet mit mehreren Längsrissen

R 10, R 30, R 50 und R 80. Dabei geben die Zahlenwerte in der Qualitätsbezeichnung die maximale Spaltweite in den Poren des Sintermetalls in  $\mu\text{m}$  an.

Die bei den Versuchen mit der Versuchs-Zerfallssperre nach Bild 4 erhaltenen Ergebnisse sind in der Tabelle 4 zusammengestellt. Der Anfangsdruck bei diesen Versuchen betrug  $p_a = 28,5 \text{ bar}$  (Abschaltdruck für Acetylenverdichter in Acetylenfüllwerken nach TRAC 206).

War das Gerät so an die Vorleitung angeschlossen, daß der Sintermetalleinsatz von innen durch die einlaufende Reaktionsfront beansprucht worden ist (Versuche Nr. 9 und 10), dann konnte auch bei einem Einsatz mit einer Porenweite von nur  $10 \mu\text{m}$  ein Flammendurchschlag nicht verhindert werden. Der Einsatz ist durch den Innendruck soweit aufgeweitet worden, daß er an mehreren Stellen Längsrisse bekommen hat, durch die dann ein Flammendurchschlag erfolgen konnte.

War das Gerät so an die Vorleitung angeschlossen, daß der Sintermetalleinsatz von außen durch die einlaufende Reaktionsfront beansprucht worden ist (Versuche Nr. 1 bis 8), dann konnte auch von Einsätzen mit einer Porenweite von  $30 \mu\text{m}$  noch ein Flammendurchschlag verhindert werden, bei Einsätzen mit einer Porenweite von  $80 \mu\text{m}$  ist es zu einem Flammendurchschlag gekommen.

Durch den Stoß der als Detonation einlaufenden Reaktionsfront auf das Einbauteil mit den Querbohrungen zum Umlenken des Gasstromes wurde der Sintermetalleinsatz um ca. 3 mm in der Länge gestaucht, begrenzt durch die Baulänge dieses Einbauteiles. Außerdem wurde der Einsatz durch den Explosionsdruck im Ringraum zwischen Sintermetalleinsatz und Gehäuse um bis zu 1,5 mm im Durchmesser zusammengedrückt.

Bild 14 zeigt eine Aufnahme von den nach den Versuchen Nummer eins, zwei, drei und zehn der Tabelle 4 ausgebauten Sintermetalleinsätzen, auf denen diese oben genannten Verformungen noch einmal dokumentiert werden.

Für weitere Versuche wurde das Gerät dann so geändert, daß es nicht mehr zu einer Stauchung der Sintermetalleinsätze in Längsrichtung kommen konnte (siehe Bild 5).

Die bei den Versuchen mit der Versuchs-Zerfallssperre nach Bild 5 erhaltenen Ergebnisse sind in der Tabelle 5 zusammengestellt. Bei dieser Versuchsreihe wurde neben der Qualität des Sintermetalls auch der Anfangsdruck variiert.

Aufgrund der Versuchsergebnisse kann zusammenfassend festgestellt werden, daß zylindrische Sintermetalleinsätze mit den Abmessungen  $\varnothing 27 \times \varnothing 20 \times 40 \text{ mm}$  bei Anfangsdrücken bis zu 28,5 bar und einer Beanspruchung von außen durch die einlaufende Reaktionsfront bis zu Porenweiten von  $50 \mu\text{m}$  einen Flammendurchschlag verhindern können. Bei Porenweiten von  $80 \mu\text{m}$  (Qualität R 80) können sie bei Anfangsdrücken von mehr als 25 bar einen Flammendurchschlag nicht mehr verhindern.

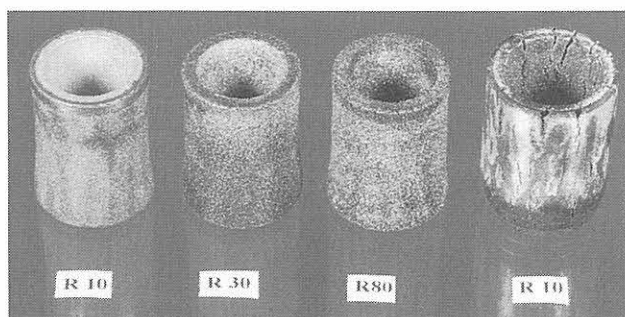


Bild 14

Verformung der Sintermetalleinsätze bei den Versuchen Nr. 1, 2, 3 und 10 der Tabelle 4



Tabelle 5

Verhalten einer Versuchs-Zerfallssperre in der Ausführung nach Bild 5 mit Sintermetalleinsätzen unterschiedlicher Qualität beim Einlaufen eines Acetylenzerfalls aus einer Rohrleitung DN 10. Beanspruchung des Sintermetalleinsatzes von außen.

| Versuch Nr. | Länge der Vorleitung mm | Sintermetallqualität | Anfangsdruck bar | Ergebnis und Bemerkungen |
|-------------|-------------------------|----------------------|------------------|--------------------------|
| 1           | 5000                    | R 80                 | 20               | kein Flammendurchschlag  |
| 2           | 5000                    | R 80                 | 25               | kein Flammendurchschlag  |
| 3           | 5000                    | R 80                 | 28,5             | Flammendurchschlag       |
| 4           | 5000                    | R 80                 | 27               | Flammendurchschlag       |
| 5           | 5000                    | R 50                 | 20               | kein Flammendurchschlag  |
| 6           | 5000                    | R 50                 | 25               | kein Flammendurchschlag  |
| 7           | 5000                    | R 50                 | 27               | kein Flammendurchschlag  |
| 8           | 5000                    | R 50                 | 28,5             | kein Flammendurchschlag  |
| 9           | 5000                    | R 50                 | 28,5             | kein Flammendurchschlag  |

a) Durch den Explosionsdruck im Ringraum zwischen Sintermetalleinsatz und Gehäusewand wird der Einsatz im Durchmesser um bis zu 1,5 mm zusammengedrückt.

#### 4.4 Schlußfolgerungen

Zerfallssperren für Hochdruck-Acetylen müssen auf beiden Anschlußseiten beim Einlaufen eines Acetylenzerfalls einen Flammendurchschlag verhindern können. Zum Bau einer Zerfallssperre für Hochdruck-Acetylen müssen demnach zwei Geräte nach Bild 5 durch einen Doppelnippel in der Weise miteinander verbunden werden, daß auf jeder Anschlußseite des Gerätes der Sintermetalleinsatz von außen durch die einlaufende Reaktionsfront beansprucht wird. Damit ist das Gerät in der Lage, auf beiden Anschlußseiten beim ersten Einlaufen der Reaktionsfront einen Flammendurchschlag zu verhindern. Bei einer gegen die strömende Gasphase einlaufenden Reaktionsfront kann es nach ihrem ersten Aufhalten durch das nachströmende Frischgas noch

zu einer am Sintermetalleinsatz stehenden Reaktionsfront, zu einem sogenannten „Nachbrand“ kommen. Bei diesem Belastungsfall kann der Sintermetalleinsatz nur über eine begrenzte Dauer einen Flammendurchschlag verhindern. Deshalb muß die Zerfallssperre noch mit einer thermisch gesteuerten Nachbrandsicherung ausgerüstet werden, durch die bei einem Nachbrand (oder bereits beim Einlaufen der Reaktionsfront) der weitere Gasdurchgang durch das Gerät unterbrochen wird.

Über Untersuchungen zur Dauer der Nachbrandsicherheit von Sperrschichten aus Sintermetall bei einem Nachbrand von Brenngas/Luft- bzw. Brenngas/Sauerstoff-Gemischen von Atmosphärendruck wird weiter unten im Abschnitt 7. berichtet.

## 5. Flammendurchschlagsicherheit von Sintermetalleinsätzen bei der Reaktion von Brenngas/Luft-Gemischen

### 5.1 Allgemeine Vorbemerkungen

Um bei der Reaktion von Brenngas/Luft-Gemischen bei Drücken um den Atmosphärendruck ein Weiterlaufen der Reaktionsfront verhindern zu können, müssen Flammensperren eingesetzt werden, in deren Sperrschicht die Spalte für den Gasdurchgang je nach Brenngas eine Spaltweite in der Größenordnung von etwa 0,1 mm bis 0,7 mm haben. Sperrschichten mit Spaltweiten dieser Größenordnung werden üblicherweise aus mehreren sogenannten Bandsicherungen (Bild 2) aufgebaut. Allerdings lassen sich Bandsicherungen mit Spaltweiten von weniger als 0,15 mm nicht mehr herstellen.

Müssen zum Aufhalten einer Reaktionsfront Sperrschichten mit Spaltweiten von weniger als 0,15 mm eingesetzt werden – etwa bei Acetylen/Luft- oder Wasserstoff/Luft-Ge-

mischen bzw. bei höheren Anfangsdrücken –, dann muß auf Formteile aus Sintermetall für die Sperrschicht zurückgegriffen werden. Deshalb sind mit der Versuchsflammensperre auch Untersuchungen zur Bestimmung der Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Sintermetalleinsätzen bei der Reaktion von Acetylen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemischen ausgeführt werden.

### 5.2 Versuche und Versuchsergebnisse

Der Aufbau für die Versuche mit der Versuchsflammensperre DN 10 ist auf dem Bild 15 skizziert.

Für die Versuche wurden der Versuchsflammensperre unterschiedlich lange Rohrleitungen DN 10 vorgeschaltet und eine 0,3 m lange Rohrleitung DN 10 nachgeschaltet. Die

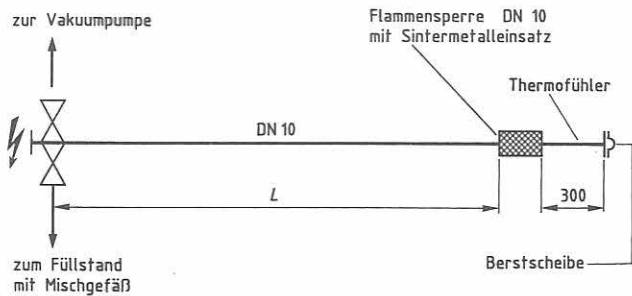


Bild 15

Aufbau für die Versuche mit der Versuchsflammensperre DN 10

Länge der Vorleitung wurde variiert von 5 m über 1 m, 0,5 m, 0,3 m bis zu 0,1 m. Die Rohrleitung mit der eingebauten Flammensperre wurde evakuiert und anschließend mit dem in einem Mischgefäß hergestellten Acetylen/ bzw. Wasserstoff/Luft-Gemisch bis zum jeweils gewählten Versuchsdruck gefüllt.

Die Zündung des Gemisches erfolgte am Anfang der vorgeschalteten Rohrleitung durch Durchschmelzen eines Metalldrahtes. Ein Flammendurchschlag wurde wieder mit Hilfe eines Thermoelements registriert, mit dem die bei einer Reaktion des Brenngas/Luft-Gemisches in der nachgeschalteten, relativ dünnwandigen Rohrleitung bewirkte Erwärmung der Rohrwand gemessen wurde.

Es wurden nur Versuche ausgeführt, bei denen die Flammensperre so an die Vorleitung angeschlossen war, daß der Sintermetalleinsatz von außen durch die einlaufende Reaktionsfront beansprucht worden ist. Eingesetzt wurden Sintermetalleinsätze der Qualitäten R 80, R 50, R 30 und R 20.

Wird die Flammensperre so an die Vorleitung angeschlossen, daß der Sintermetalleinsatz von innen durch die einlaufende Reaktionsfront beansprucht wird, dann muß bei höheren Anfangsdrücken und einer als Detonation einlaufenden Reaktion damit gerechnet werden, daß es durch die hohe Innendruckbelastung zu einer mechanischen Zerstörung des Einsatzes und dadurch bedingt zu einem Flammen-

durchschlag kommt (siehe dazu auch Tabelle 4, Bemerkung c bzw. Bild 14).

In dem Diagramm auf Bild 16 sind die bei den Versuchen mit der Versuchs-Flammensperre und Sintermetalleinsätzen der Qualität R 80 erhaltenen Ergebnisse zusammengestellt. Aufgetragen ist der Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Flammensperre in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Wasserstoff/Luft-Gemische. Parameter ist die Länge der Vorleitung. In das Diagramm mit eingetragen ist die Grenzspaltweite  $s_{20}$  für Acetylen/ und Wasserstoff/Luft-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur (4).

Bei den zunächst mit Acetylen/Luft-Gemischen und Anfangsdrücken bis 6,5 bar ausgeführten Versuchen ist es bei allen Rohrlängen und Gemischzusammensetzungen (variiert zwischen 5 und 10 Vol %) nicht zu Flammendurchschlägen gekommen. Bei der ersten Versuchsreihe mit der 5 m langen Vorleitung wurde noch die Versuchsflammensperre nach Bild 4 eingesetzt.

Danach wurde festgestellt, daß der Einsatz durch den Stoß bei der detonativ verlaufenden Reaktion in der Länge um etwa 1,5 mm gestaucht worden ist. Deshalb ist bei den danach ausgeführten Versuchsserien nur noch die Versuchsflammensperre nach Bild 5 eingesetzt worden, bei der baubedingt eine Stauchung der Einsätze in Längsrichtung nicht mehr auftreten kann.

Bei den mit Wasserstoff/Luft-Gemischen ausgeführten Versuchen ist es nur bei Gemischen mit Volumenanteilen von weniger als 23 % Wasserstoff zu Flammendurchschlägen gekommen. Variiert wurde der Volumenanteil an Wasserstoff im Gemisch zwischen 14 % und 55 %.

Diese Versuchsergebnisse sind zunächst sehr überraschend. Erfahrungsgemäß würde man den niedrigsten Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit etwa beim Gemisch mit der kleinsten Grenzspaltweite  $s_{20}$  (Normspaltweite) erwarten.

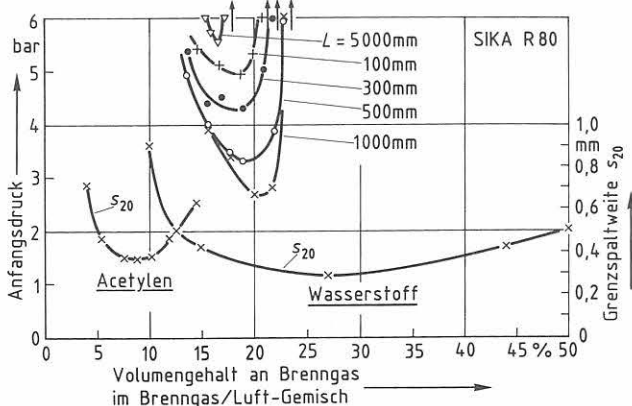


Bild 16

Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Versuchsflammensperre DN 10 mit einem Sintermetalleinsatz der Qualität R 80 bei der Reaktion von Wasserstoff/Luft-Gemisch und Variation der Länge der Vorleitung sowie Grenzspaltweite  $s_{20}$  für Acetylen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur

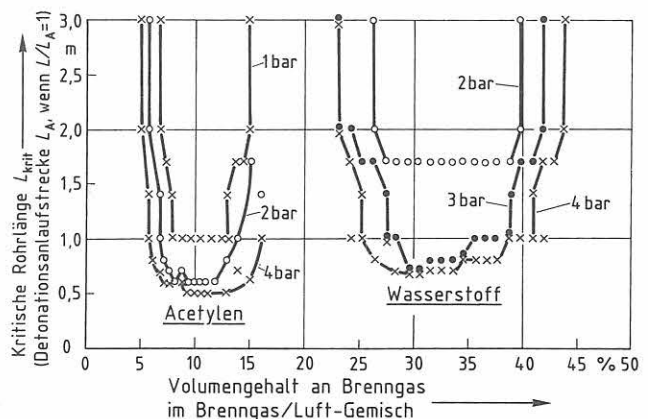


Bild 17

Unter der Zusatzbedingung Länge der Rohrleitung  $L$  gleich Länge der Detonationsanlaufstrecke  $L_A$  ermittelte Detonationsanlaufstrecken für Acetylen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemische bei Anfangsdrücken von 1, 2, 3 und 4 bar in glatten Rohrleitungen mit 10 mm Innendurchmesser

Zur weiteren Interpretation der Versuchsergebnisse sind in dem Diagramm auf *Bild 17* für Acetylen/ und Wasserstoff/ Luft-Gemische und verschiedene Anfangsdrücke die nach einem vom Autor entwickelten Verfahren (8) ermittelten Detonationsanlaufstrecken zusammengestellt. Aufgetragen ist die als kritische Rohrlänge bezeichnete, unter der Zusatzbedingung Länge der Rohrleitung gleich Länge der Detonationsanlaufstrecke ermittelte, Detonationsanlaufstrecke in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung, mit dem Anfangsdruck als Parameter (siehe dazu auch weiter oben Abschnitt 4.2). Die Randbedingungen waren die gleichen wie bei den Versuchen mit der Flammensperre am Ende der Vorleitung: glatte Rohrleitung mit 10 mm Innendurchmesser ohne jede Störstelle zur Turbulenzerzeugung, ruhende Gasphase, Zündung durch durchschmelzenden Metalldraht am Anfang der Rohrleitung.

Wie man unmittelbar sieht, kommt es bei den gewählten Randbedingungen und Volumenanteilen an Wasserstoff von weniger als 23 % bis zu Rohrlängen von drei Metern nicht mehr zum Anlaufen einer detonativ verlaufenden Reaktion (Rohrleitung DN 10 ohne jede Störstelle zur Erzeugung von zusätzlicher Turbulenz im Frischgas vor der Reaktionsfront. (Bei den Ventilen im Zünd- und Ventilblock am Anfang der Rohrleitung schließt der Ventilkegel bündig mit der Rohroberfläche).

Durch irgendeinen Vorgang bei einer detonativ verlaufenden Reaktion wird bei Sperrschichten aus Sintermetall offensichtlich bewirkt, daß der Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit ansteigt.

Die kürzesten Anlaufstrecken sind bei Wasserstoff/Luft-Gemischen und 4 bar Anfangsdruck aber immer noch etwa 700 mm lang. Auch bei Längen der vorgeschalteten Rohrleitung von nur  $L = 500, 300$  und  $100$  mm ist es bei den Versuchen aber noch zu diesem Anstieg des Grenzdruckes für die Flammendurchschlagsicherheit des Sintermetalleinsatzes gekommen. Dieses Ansteigen des Grenzdruckes muß also durch einen Vorgang bewirkt werden, der auch bereits beim Anlaufen von Detonationen eine wesentliche Rolle spielt. Damit eine Reaktion zu einer Detonation anlaufen kann, müssen Stoßwellen gebildet werden (8). Durch diese vor der Reaktionsfront an der Sperrschicht eintreffenden Stoßwellen müssen demnach Veränderungen am Zustand der Gasphase in den Spalten der Sperrschicht bewirkt werden, die zu dem hier festgestellten Anstieg beim Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit führen. Auch bei dem Laufweg von 5 m und Detonationsanlaufstrecken von nur 0,7 m treffen zumindest einige der beim Detonationsanlaufvorgang gebildeten Stoßwellen noch rechtzeitig genug vor dem Eintreffen der Reaktionsfront der dann detonativ verlaufenden Reaktion an der Sperrschicht ein, um die für den Anstieg des Grenzdruckes erforderlichen Veränderungen am Zustand der Gasphase in den Spalten der Sperrschicht aus Sintermetall zu erzwingen.

Bei inzwischen mit einer Modell-Flammensperre DN 20 und einer Sperrschicht aus sogenannten Bandsicherungen ausgeführten Untersuchungen (9) ist festgestellt worden, daß bei diesen Sperrschichten der Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit durch die vor der Reak-

tionsfront eintreffenden Stoßwellen herabgesetzt wird. Bei den hier mit einer Versuchsflammensperre und einer Sperrschicht aus Sintermetall ausgeführten Untersuchungen dagegen stellt man fest, daß der Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit durch die vor der Reaktionsfront eintreffenden Stoßwellen nicht herabgesetzt, sondern im Gegenteil heraufgesetzt wird.

Dieses unterschiedliche Verhalten der beiden Sperrschichten muß durch die sehr unterschiedliche Geometrie (Struktur) der Spalte in der Sperrschicht aus Bandsicherungen einerseits (glatter Spalt mit konstantem Querschnitt, siehe Bild 2) und in der Sperrschicht aus Sintermetall andererseits (Spalte mit starken Querschnittsveränderungen und Richtungsänderungen, siehe Bild 3) verursacht worden sein.

Bei Wasserstoff ist die Grenzspaltweite bei den unterstöchiometrischen Gemischen noch relativ klein, bei denen entweder

- a) die Reaktionsfront erst dann an der Sperrschicht eintrifft, wenn die durch die vorgelaufenen Stoßwellen bewirkten, nur sehr kurzzeitig wirksamen Veränderungen in den Spalten der Sperrschicht nicht mehr wirksam sind oder
- b) die vor der Reaktionsfront eintreffenden Stoßwellen nur noch so schwach sind, daß es nicht zu den zur Erhöhung der Flammendurchschlagsicherheit der Sperrschicht erforderlichen Veränderungen am Zustand der Gasphase in den Spalten der Sperrschicht kommen kann.

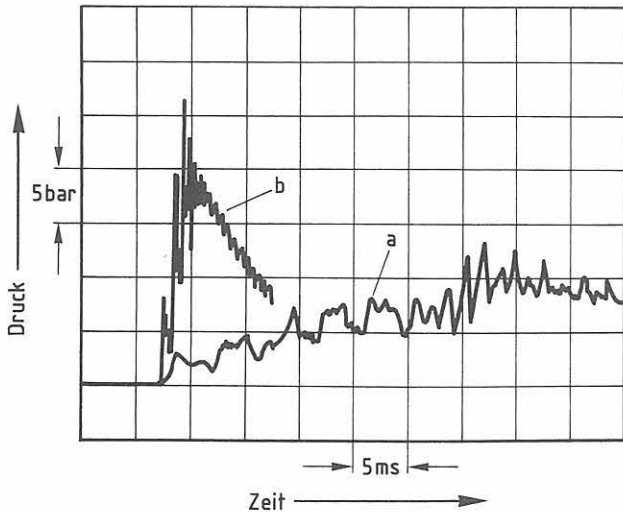
Deshalb kann es hier, abhängig von den Randbedingungen, bei Anfangsdrücken unter 6 bar noch zu Flammendurchschlägen kommen.

Bei überstöchiometrischen Wasserstoff/Luft-Gemischen und bei unter- bzw. überstöchiometrischen Acetylen/Luft-Gemischen ist die Grenzspaltweite bei den Gemischen, bei denen der Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Sperrschicht durch vorgelaufene Stoßwellen nicht mehr erhöht wird, bereits so groß, daß es hier bei Einsätzen der Qualität R 80 und Anfangsdrücken unter 6 bar nicht mehr zu Flammendurchschlägen kommen kann.

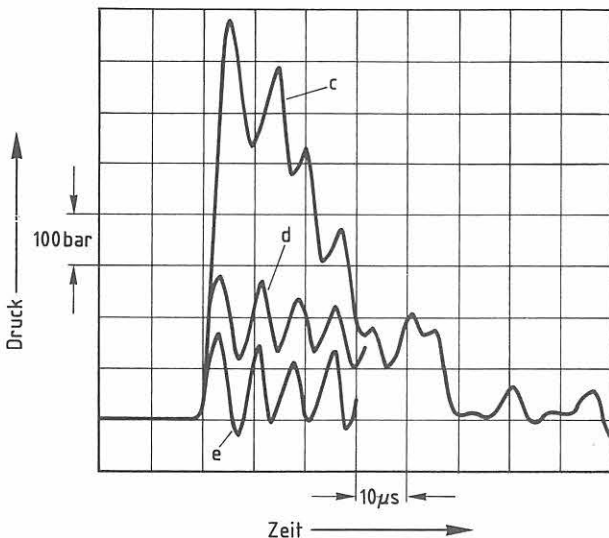
Auf den *Bildern 18 und 19* werden einige Druckaufzeichnungen gezeigt, die mit Hilfe eines am Ende der Rohrleitung in Achsrichtung eingebauten Druckaufnehmers und eines Speicheroszillographen registriert worden sind. Der Anfangsdruck betrug bei allen Versuchen  $p_a = 4,0$  bar (3,0 bar Überdruck).

Beim Versuch für die Aufzeichnung a auf Bild 18 betrug die Länge der Rohrleitung  $L = 1,0$  m und der Volumenanteil Wasserstoff im Gemisch 20 %. Bei diesen Bedingungen ist es reproduzierbar immer zu Flammendurchschlägen gekommen (siehe Bild 16).

Beim Versuch für die Aufzeichnung b auf Bild 18 betrug die Länge der Rohrleitung  $L = 0,3$  m und der Volumenanteil Wasserstoff im Gemisch 30 %. Obwohl bei diesen Bedingungen:



**Bild 18**  
 Zeitlicher Verlauf des Druckes am Ende einer Rohrleitung DN 10 bei der Reaktion von Wasserstoff/Luft-Gemisch mit 4 bar Anfangsdruck und  
 a) 20 Vol-% Wasserstoff sowie  $L = 1000 \text{ mm}$   
 b) 30 Vol-% Wasserstoff sowie  $L = 300 \text{ mm}$



**Bild 19**  
 Zeitlicher Verlauf des Druckes am Ende einer Rohrleitung DN 10 bei der Reaktion von Wasserstoff/Luft-Gemisch mit 30 Vol-% Wasserstoff bei 4 bar Anfangsdruck sowie  
 c) Länge der Rohrleitung  $L = 700 \text{ mm}$  ( $L = L_A = L_{krit}$ )  
 d) Länge der Rohrleitung  $L = 1000 \text{ mm}$  ( $L > L_A$ )  
 e) Länge der Rohrleitung  $L = 2000 \text{ mm}$  ( $L \gg L_A$ )

- a) die Grenzspaltweite des Gemisches  $s_{20}$  kleiner ist,  
 b) der Explosionsdruck am Rohrende – und damit am Sperreingang – größer ist und außerdem auch  
 c) die Geschwindigkeit der einlaufenden Reaktionsfront größer ist (dafür die Reaktionsfront aber auch schneller nach den vorher eingelaufenen Stoßwellen an der Sperrschicht eintrifft!)  
 ist es reproduzierbar nicht mehr zu Flammendurchschlägen gekommen.

Bei den Bedingungen, die für die Versuche mit den Aufzeichnungen a und b auf Bild 18 gewählt worden sind, ist die Reaktionsfront als Deflagration in die Flammensperre eingelaufen.

Bei den Bedingungen, die für die Versuche mit den Aufzeichnungen c, d und e auf Bild 19 gewählt worden sind, ist die Reaktionsfront als Detonation in die Flammensperre eingelaufen. Bei der Aufzeichnung c als instabile Detonation bei extrem instationären Bedingungen ( $L = \text{Länge der Detonationsanlaufstrecke } L_A = \text{kritische Rohrlänge } L_{krit} = 700 \text{ mm}$ , siehe Bild 17), bei der Aufzeichnung d als stabile Detonation bei instationären Bedingungen ( $L = 1000 \text{ mm} = 1,4 \times L_A$ ) und bei der Aufzeichnung e als stabile Detonation bei nahezu stationären Bedingungen ( $L = 2000 \text{ mm} \gg L_A$ ). Bei allen drei Versuchen wurde das gleiche Gemisch mit etwa 30 % Volumenanteilen Wasserstoff eingesetzt. Auch bei diesen Bedingungen ist es reproduzierbar nicht zu Flammendurchschlägen gekommen.

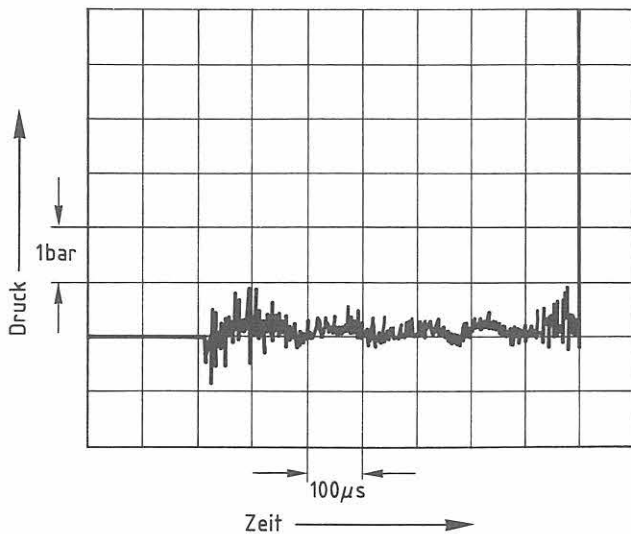
Man kann sich leicht vorstellen, daß insbesondere bei den Bedingungen vom Versuch mit der Druckaufzeichnung c bei  $L = L_A = L_{krit}$  der Sintermetalleinsatz mechanisch sehr stark beansprucht wird, wenn die Reaktionsfront von innen auf den Einsatz trifft. Flammensperren mit einem hohlzylindrischen Sintermetalleinsatz als Sperrschicht sollten deshalb immer so aufgebaut sein, daß der Einsatz – wie bei den hier ausgeführten Versuchen – von außen durch die einlaufende Reaktionsfront beansprucht wird.

Bei den Versuchen mit der bereits oben erwähnten Modell-Flammensperre DN 20 mit Sperrschichten aus Bandsicherungen hat sich bei der Belastung der Sicherung durch eine instabile Detonation bei extrem instationären Bedingungen, d. h. bei Bedingungen wie beim Versuch mit der Druckaufzeichnung c auf Bild 19, nicht nur die größte mechanische Beanspruchung der Sperrschicht sondern auch der niedrigste Grenzdruck für die Flammendurchschlagssicherheit der Sperrschicht ergeben (9).

Über die beim detonativen Verlauf von Reaktionen auftretenden Drucksteigerungen und die dadurch bewirkten Beanspruchungen von Rohrleitungen ist in (7) berichtet worden. In dieser Arbeit wird sehr detailliert auf die einzelnen Belastungsfälle bei detonativ verlaufenden Reaktionen eingegangen.

Die vor der Reaktionsfront an der Sperrschicht eintreffenden Stoßwellen (8) konnten mit Hilfe der eingesetzten Druckaufnehmer nicht registriert werden. Auf dem Bild 20 ist aber von einem weiteren Versuch unter der Bedingung  $L = L_A = L_{krit} = 700 \text{ mm}$  und 30 % Volumenanteile Wasserstoff eine Druckaufzeichnung wiedergegeben, bei der versucht worden ist, die vor dem Eintreffen der Reaktionsfront am Meßort ablaufenden Ereignisse zu erfassen.

Nimmt man nach (10) an, daß bei einer Anlaufstrecke von  $L_A = 700 \text{ mm}$  in Rohren mit 10 mm Innendurchmesser die mittlere Detonationsanlaufgeschwindigkeit etwa 600 m/s beträgt, dann ist die Zündung des Gemisches ca. 1170 Mikrosekunden vor dem Eintreffen der Reaktionsfront am Meßort erfolgt. Nimmt man weiterhin an, daß die erste Stoßwelle bei der Zündung des Gemisches erzeugt wird und etwa mit der Detonationsgeschwindigkeit des Gemisches von 1800 m/s (11) durch die Rohrleitung läuft, dann trifft



**Bild 20**  
 Druckanzeige am Ende einer 700 mm langen Rohrleitung DN 10 vor dem Eintreffen der Detonationsfront bei der Reaktion von Wasserstoff/Luft-Gemisch mit 30 Vol-% Wasserstoff bei 4 bar Anfangsdruck

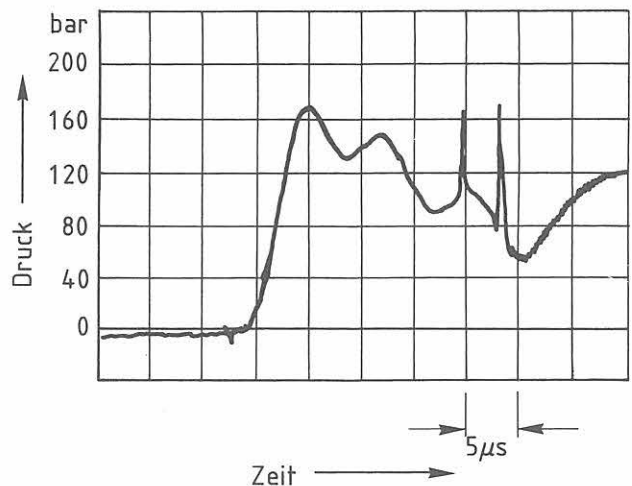
diese Stoßwelle bereits ca. 390 Mikrosekunden nach der Zündung, d. h. etwa 720 Mikrosekunden vor der Reaktionsfront am Meßort ein.

Wie man auf der Druckaufzeichnung sieht, wird der Druckaufnehmer etwa 680 Mikrosekunden vor dem Eintreffen der Reaktionsfront am Einbauort zu Eigenschwingungen angeregt. Aufgrund der kurzen Überschlagsrechnung muß man schließen, daß die erste Anregung der Eigenschwingungen des Druckaufnehmers tatsächlich durch eine bereits am Zündort bei der Zündung des Gemisches erzeugte Stoßwelle erfolgt sein muß, weitere Anregungen der Eigenschwingungen wurden dann noch durch die während des Anlaufvorganges an anderen Stellen bei sprunghaften Erhöhungen der Energiefreisetzung erzeugten Stoßwellen bewirkt (8). Die gleichen Stoßwellen treffen bei einer am Rohrende angeordneten Flammensperre auf deren Sperrschicht und bewirken bei einer Sperrschicht aus Sintermetall eine Erhöhung beim Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Sperrschicht. Wie beim Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Sperrschicht, so können auch bei der Druckmessung nur Auswirkungen der vor der Reaktionsfront eintreffenden Stoßwellen, d. h. die durch sie angeregten Eigenschwingungen des Druckaufnehmers, registriert werden.

Die vor der Reaktionsfront am Druckaufnehmer eintreffenden Stoßwellen können wegen ihrer extrem kurzen Einwirkdauer auf den Druckaufnehmer bei der Explosionsdruckmessung nicht erfaßt werden. Hat man jedoch Randbedingungen vorliegen, bei denen auch noch Stoßwellen erst dann am Druckaufnehmer eintreffen, wenn die Schwaden kurz nach der Detonationsfront mit hoher Schwadengeschwindigkeit auf den Druckaufnehmer auftreffen, dann kann der bereits hohe Impuls der Schwaden durch die Stoßwelle kurzzeitig erhöht und diese Impulsverstärkung dann auch vom Druckaufnehmer registriert werden.

Auf dem *Bild 21* ist beispielhaft die Druckaufzeichnung von einem Versuch mit einer sphärischen Detonation von Acetylen/Sauerstoff-Gemisch bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur in einem kugelförmigen Behälter von 300 mm Durchmesser wiedergegeben. Der Volumenanteil an Acetylen im Gemisch betrug 35 %, die Zündung des Gemisches erfolgte durch Durchschmelzen eines Metalldrahtes in Behältermitte.

Die beiden steilen Druckpeaks mit einer Dauer von etwa einer Mikrosekunde müssen auf die oben beschriebene Art und Weise durch Stoßwellen verursacht worden sein.

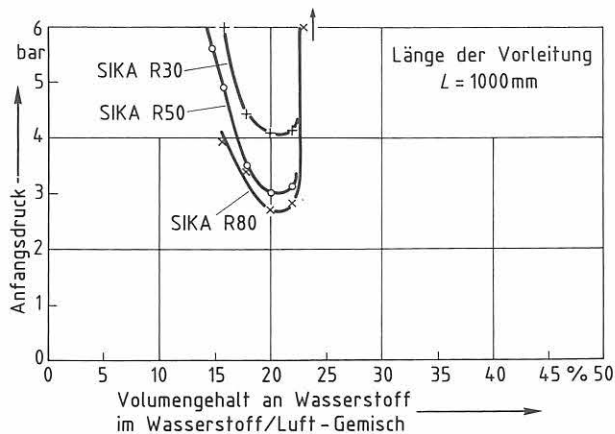


**Bild 21**  
 Zeitlicher Verlauf des Druckes an der Behälterwand bei der Reaktion eines Acetylen/Sauerstoff-Gemisches von Atmosphärendruck und Raumtemperatur mit 35 Vol-% Acetylen in einem nahezu kugelförmigen Behälter mit 300 mm Durchmesser bei thermischer Zündung in Behältermitte

Während sich für den zeitlichen Druckanstieg in der Detonationsfront ein Wert von etwa  $4 \times 10^7$  bar/s ergibt, ist der Druckanstieg in diesen Stoßwellen mit mehr als  $10^9$  bar/s um mindestens zwei Größenordnungen steiler.

Nach den Formeln der Gasdynamik (12) beträgt bei einem idealen Gas mit konstanter spezifischer Wärme der in der Stoßwelle erzeugte Drucksprung  $p_2/p_a = 2 \kappa M^2 - (\kappa - 1) / (\kappa + 1)$ .

In dieser Formel muß für die MACH-Zahl M das Verhältnis von Stoßwellengeschwindigkeit zu Schallgeschwindigkeit eingesetzt werden. Der Adiabatenexponent  $\kappa$  ist das Verhältnis der spezifischen Wärmen bei konstantem Druck und konstanter Temperatur. Wegen der nahezu dreimal so großen Schallgeschwindigkeit bei vergleichbar großen Stoßwellengeschwindigkeiten und  $\kappa$ -Werten müssen demnach die durch die Stoßwellen bewirkten Druckpeaks bei Versuchen mit z. B. stöchiometrischem Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch erheblich kleiner sein als bei dem hier eingesetzten Acetylen/Sauerstoff-Gemisch. Bei entsprechenden Versuchen mit stöchiometrischem Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch fallen die auf der Druckaufzeichnung registrierten, durch die Stoßwellen bewirkten Druckpeaks tatsächlich wesentlich kleiner aus. Ein Indiz dafür, daß es sich bei den unter diesen Randbedingungen vom Druck-



**Bild 22**  
Grenzdruk für die Flammendurchschlagsicherheit der Versuchsflammensperre DN 10 mit Sintermetalleinsätzen der Qualität R 80, R 50 und R 30 bei der Reaktion von Wasserstoff/Luft-Gemischen und einer Länge der Vorleitung von  $L = 1000$  mm

aufnehmer registrierten, extrem steilen und kurzzeitigen Druckpeaks tatsächlich um durch Stoßwellen bewirkte Impulsverstärkungen der mit hoher Geschwindigkeit auf den Druckaufnehmer auftreffenden Schwaden handelt.

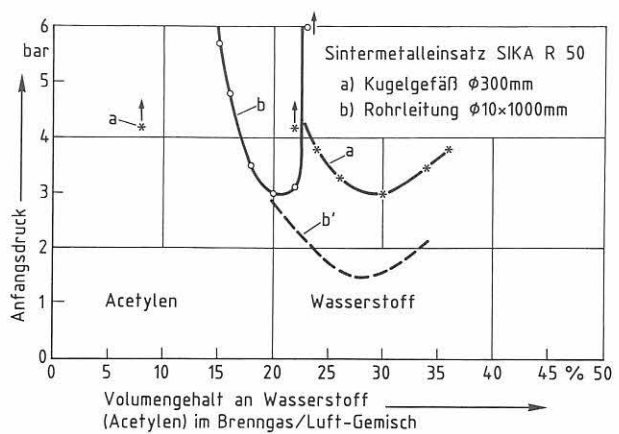
In dem Diagramm auf *Bild 22* sind noch die Ergebnisse von Versuchen zusammengestellt, bei denen die Versuchsflammensperre nach *Bild 5* mit Einsätzen der Qualitäten R 80, R 50, R 30 und R 20 ausgerüstet war. Aufgetragen ist wieder der Grenzdruk für die Flammendurchschlagsicherheit in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Wasserstoff/Luft-Gemische. Die Länge der Vorleitung betrug bei allen Versuchen  $L = 1,0$  m.

Bei Einsätzen der Qualität R 20 ist es bei Anfangsdrücken bis zu 6,0 bar nicht mehr zu Flammendurchschlägen gekommen. Flammendurchschläge konnten erst bei Versuchen mit Anfangsdrücken von 8,9 bar an erreicht werden.

Läuft die Reaktionsfront nicht aus einer vorgeschalteten Rohrleitung, sondern z. B. aus einem kugelförmigen Behälter mit 300 mm Durchmesser in die Flammensperre ein, dann braucht bei Brenngas/Luft-Gemischen – anders als bei Brenngas/Sauerstoff-Gemischen (8) – noch nicht mit dem Entstehen von Stoßwellen und damit dann auch nicht mit dem Einlaufen von Stoßwellen in die Flammensperre gerechnet zu werden.

In dem Diagramm auf *Bild 23* sind die Ergebnisse von Versuchen zusammengestellt, bei denen die Versuchsflammensperre nach *Bild 5* mit einem Einsatz der Qualität R 50 an einem kurzen Stutzen DN 10 eines Behälters mit 300 mm Durchmesser angeschlossen war. Aufgetragen ist wieder der Grenzdruk für die Flammendurchschlagsicherheit in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der eingesetzten Wasserstoff (Acetylen)/Luft-Gemische. Die Zündung des Gemisches erfolgte etwa in Behältermitte durch Durchschmelzen eines Metalldrahtes.

Wie man mit Hilfe der auf *Bild 16* angegebenen Kurve für die Grenzspaltweite von Wasserstoff/Luft-Gemischen er-



**Bild 23**  
Grenzdruk für die Flammendurchschlagsicherheit der Versuchsflammensperre DN 10 mit einem Sintermetalleinsatz der Qualität R 50, wenn die Reaktionsfront  
a) aus einem Kugelgefäß mit 300 mm Durchmesser einläuft oder  
b) aus einer  $L = 1000$  mm langen Rohrleitung DN 10 einläuft

kennt, kommt es bei diesen Randbedingungen dann auch tatsächlich etwa beim Gemisch mit der kleinsten mit dem Normspaltweitenprüfgerät ermittelten Grenzspaltweite zu dem niedrigsten Grenzdruk für die Flammendurchschlagsicherheit der Sperrschicht.

In das Diagramm mit eingetragen ist der Grenzdruk für die Flammendurchschlagsicherheit der gleichen Sperrschicht, wenn die Reaktionsfront aus einer 1000 mm langen Rohrleitung DN 10 in die Versuchsflammensperre einläuft. Die in Verlängerung der Kurve b strichliert eingetragene Kurve b' deutet an, bei welchem Druck etwa der Grenzdruk für die Flammendurchschlagsicherheit der Sperrschicht liegen würde, wenn es in der Rohrleitung bei Gemischen mit mehr als 22 % Volumenanteilen Wasserstoff vor dem Eintreffen der Reaktionsfront an der Sperrschicht nicht zum Einlaufen von Stoßwellen kommen würde.

Kommt es in der Rohrleitung bei Gemischen mit mehr als 22 % Volumenanteilen Wasserstoff vor dem Eintreffen der Reaktionsfront zum Einlaufen von Stoßwellen, dann müssen dadurch Zustände bei der Reaktionsfortpflanzung im Spalt erzeugt werden, die zu einem Abbruch der Reaktion in den Spalten der Sperrschicht führen, und die dadurch einen ganz erheblichen Anstieg beim Grenzdruk für die Flammendurchschlagsicherheit der Sperrschicht bewirken.

Bei einer Sperrschicht aus Bandsicherungen mit einer völlig anderen Struktur (Geometrie) der Spalte dagegen kommt es durch die vor der Reaktionsfront eintreffenden Stoßwellen bei der Reaktionsfortpflanzung in den Spalten der Sperrschicht zu Zuständen, durch die nicht ein Anstieg sondern im Gegenteil ein deutlicher Abfall beim Grenzdruk für die Flammendurchschlagsicherheit bewirkt wird (9). Dabei hängt dieser Abfall beim Grenzdruk für die Flammendurchschlagsicherheit auch noch von der Gesamtgeometrie der Spalte über die Spalllänge ab. Bei einer Sperrschicht aus nur einer Bandsicherung größerer Dicke (glatte Spalte mit konstantem Querschnitt ohne jede Störstelle im Laufweg für die Stoßwellen) ist der Abfall beim Grenzdruk

größer als bei einer Sperrschicht aus mehreren Bandsicherungen geringerer Dicke (glatte Spalte mit konstantem Querschnitt und mehreren ( $n - 1$ ) Störstellen im Laufweg für die Stoßwellen). Oder anders formuliert:

Die wenigen Störstellen bei einer aus mehreren Bandsicherungen aufgebauten Sperrschicht führen zu einem Anstieg beim Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Sperrschicht, wenn vor der Flammenfront Stoßwellen in die Sperrschicht einlaufen. Die vielen Störstellen bei einer Sperrschicht aus Sintermetall führen zu einem ganz erheblichen Anstieg beim Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit (Faktor  $> 4$  nach den Kurven b und b' auf Bild 23), wenn vor der Flammenfront Stoßwellen in die Sperrschicht einlaufen.

### 5.3 Zusammenfassung

Die Diskussion der Ergebnisse der Versuche im Abschnitt 5.2 führt zu der Feststellung, daß bei einer Sperrschicht aus Sintermetall der Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit durch die vor der Reaktionsfront an der Sperrschicht eintreffenden Stoßwellen ganz wesentlich heraufgesetzt wird. Dadurch kann erklärt werden, weshalb Sperrschichten aus Sintermetall z. B. beim Wasserstoff den niedrigsten Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit nicht – wie man im Grunde erwarten würde – beim Gemisch mit der kleinsten Grenzspaltweite  $s_{20}$  (Norm-

spaltweite) haben, sondern bei Gemischen außerhalb der Detonationsgrenzbedingungen, bei denen entweder

- a) die Reaktionsfront erst dann eintrifft, wenn die durch die vorgelaufenen Stoßwellen bewirkten, nur über eine sehr kurze Dauer wirksamen Veränderungen beim Zustand der Gasphase in den Spalten der Sperrschicht nicht mehr wirksam sind oder
- b) die vor der Reaktionsfront eintreffenden Stoßwellen nur noch so schwach sind, daß es nicht mehr zu den für eine Erhöhung der Flammendurchschlagsicherheit der Sperrschicht erforderlichen Veränderungen beim Zustand der Gasphase in den Spalten der Sperrschicht kommen kann.

Welche Vorgänge sich dabei im einzelnen abspielen, kann vorerst nur vermutet werden.

Werden Sintermetalleinsätze als Flammensperren zur Absicherung von Gasmeß- bzw. Gaswarngeräten eingesetzt, dann muß auch noch ihre Flammendurchschlagsicherheit bei einem Nachbrand von strömendem Brenngas/Luft-Gemisch an dem Einsatz beachtet werden. Können dabei nur Volumenströme von maximal 200 l/h auftreten, dann sind die als Flammensperre eingesetzten Sintermetalleinsätze nach den Ergebnissen der Nachbrandversuche auf Bild 36 auch bei Acetylen/ und Wasserstoff/Luft-Gemischen bereits als dauerbrandsicher anzusehen. Siehe dazu weiter unten den Abschnitt 7.

## 6. Flammendurchschlagsicherheit von Sintermetalleinsätzen bei der Reaktion von Brenngas/Sauerstoff-Gemischen

### 6.1 Versuche mit der Versuchsflammensperre DN 10

Der Aufbau für die Versuche mit der Versuchsflammensperre DN 10 ist bereits auf dem Bild 15 skizziert.

Für die Versuche wurden der Versuchsflammensperre unterschiedlich lange Rohrleitungen DN 10 vorgeschaltet und eine 0,3 m lange Rohrleitung DN 10 nachgeschaltet. Die Rohrleitung mit der eingebauten Flammensperre wurde evakuiert und anschließend mit dem in einem Mischgefäß hergestellten Brenngas/Sauerstoff-Gemisch bis zum jeweils gewählten Versuchsdruck gefüllt. Die Zündung des Gemisches erfolgte am Anfang der vorgeschalteten Rohrleitung durch Durchschmelzen eines Metalldrahtes. Ein Flammendurchschlag wurde mit Hilfe eines Thermoelementes registriert, mit dem die bei einer Reaktion des Brenngas/Sauerstoff-Gemisches in der nachgeschalteten, relativ dünnwandigen Rohrleitung bewirkte Erwärmung der Rohrwand gemessen wurde.

Es wurden Versuche ausgeführt, bei denen die Flammensperre so an die Vorleitung angeschlossen war, daß der

Sintermetalleinsatz von außen und von innen durch die einlaufende Reaktionsfront beansprucht worden ist. Eingesetzt wurden Sintermetalleinsätze der Qualität R 30, R 20, R 10 und R 3.

In dem Diagramm auf *Bild 24* sind die bei Versuchen mit der Versuchsflammensperre und Acetylen/Sauerstoff-Gemischen erhaltenen Ergebnisse zusammengestellt. Aufgetragen ist der Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Flammensperre in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Acetylen/Sauerstoff-Gemisches. Parameter ist die Qualität der Sintermetalleinsätze. Eingesetzt wurden Einsätze aus R 30, R 10 und R 3. Die Länge der Vorleitung betrug bei allen Versuchen  $L = 5000$  mm.

Mit der Flammensperre und Einsätzen der Qualität R 3 wurden Versuche ausgeführt, bei denen der Einsatz sowohl von außen als auch von innen durch die einlaufende Reaktionsfront beansprucht worden ist. Dabei ist es beim Versuch mit 4,5 bar Anfangsdruck, einem Gemisch mit 42 % Volumenanteilen Acetylen und einer Beanspruchung des Einsatzes von innen durch die einlaufende Reaktionsfront zu einem Aufreißen des Einsatzes gekommen.

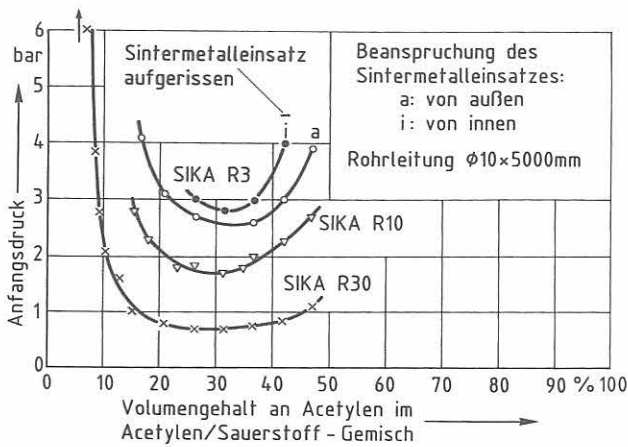


Bild 24

Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Versuchsflammsperre DN 10 mit Sintermetalleinsätzen der Qualität R 30, R 10 und R 3 bei der Reaktion von Acetylen/Sauerstoff-Gemischen und einer Länge der Vorleitung von  $L = 5000$  mm

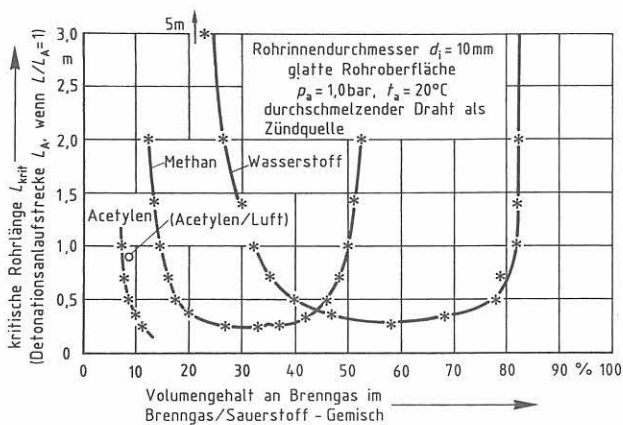


Bild 25

Unter der Zusatzbedingung Länge der Rohrleitung gleich Länge der Detonationsanlaufstrecke ermittelte Detonationsanlaufstrecken für Acetylen/, Methan/ und Wasserstoff/Sauerstoff-Gemische von Atmosphärendruck und Raumtemperatur in Rohren mit 10 mm Innendurchmesser

In dem Diagramm auf Bild 25 sind für Acetylen/, Methan/ und Wasserstoff/Sauerstoff-Gemische von Atmosphärendruck die nach einem vom Autor entwickelten Verfahren (8) ermittelten Detonationsanlaufstrecken zusammengestellt. Aufgetragen ist die als kritische Rohrlänge  $L_{krit}$  bezeichnete, unter der Zusatzbedingung Länge der Rohrleitung  $L$  gleich Länge der Detonationsanlaufstrecke  $L_A$  ermittelte, Detonationsanlaufstrecke in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung. Die Randbedingungen waren: glatte Rohrleitung mit 10 mm Innendurchmesser ohne jede Störstelle zur Turbulenzerzeugung, bei der Zündung ruhende Gasphase, Zündung durch einen durchschmelzenden Metalldraht am Anfang der Rohrleitung.

Danach ist bei den oben angegebenen Versuchsbedingungen: 4,5 bar Anfangsdruck, 42 Vol % Acetylen und Länge der Vorleitung  $L = 5000$  mm der Sintermetalleinsatz durch den Impuls einer als stabile Detonation bei stationären Bedingungen einlaufenden Reaktionsfront beansprucht und mechanisch zerstört worden. Mit noch erheblich stärkeren Belastungen muß dann gerechnet werden, wenn die Reaktionsfront bei kürzeren Vorleitungen auch als stabile De-

tonation bei instationären Bedingungen oder sogar als instabile Detonation bei extrem instationären Bedingungen (Länge der Rohrleitung etwa Länge der Detonationsanlaufstrecke) in die Flammensperre einlaufen kann (8). Dann muß bei einem von innen belasteten hohlzylindrischen Sintermetalleinsatz auch bereits bei wesentlich niedrigeren Anfangsdrücken mit einer mechanischen Zerstörung des Einsatzes gerechnet werden.

Flammensperren mit einem hohlzylindrischen Sintermetalleinsatz als Sperrschicht sollten deshalb immer so aufgebaut sein, daß der Einsatz von außen durch die einlaufende Reaktionsfront beansprucht wird (siehe dazu auch Tabelle 4, Bemerkung c, bzw. Bild 14).

In dem Diagramm auf Bild 26 sind die bei Versuchen mit der Versuchsflammsperre und Methan/, Propan/, Acetylen/ sowie Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen erhaltenen Ergebnisse zusammengestellt. Aufgetragen ist wieder der Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Flammensperre in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung. Alle Versuche wurden mit nur einem Sintermetalleinsatz der Qualität R 30 ausgeführt. Die Länge der Vorleitung betrug  $L = 5000$  mm und  $L = 1000$  mm.

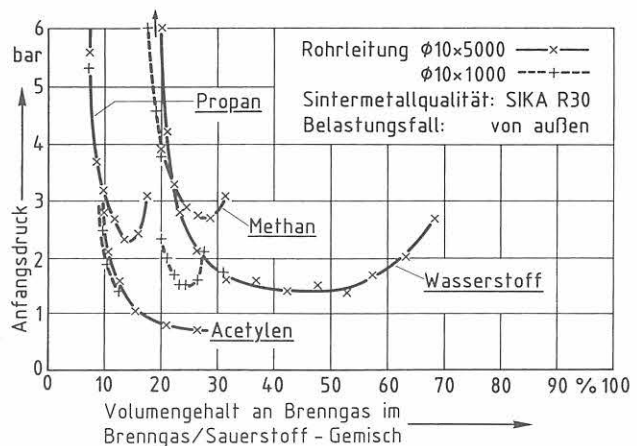


Bild 26

Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Versuchsflammsperre DN 10 mit einem Sintermetalleinsatz der Qualität R 30 bei der Reaktion von Acetylen/, Propan/, Methan/ und Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen und einer Länge der Vorleitung von  $L = 5000$  mm und  $1000$  mm

Bei den Kohlenwasserstoff/Sauerstoff-Gemischen wurde darauf verzichtet, den Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit auch bei stärker überstöchiometrischen Gemischen zu bestimmen. Bei den mit Acetylen/Sauerstoff-Gemischen ausgeführten Versuchen (siehe Bild 24) ist festgestellt worden, daß der Grenzdruck mit zunehmender Zahl der Versuche durch den bei diesen Bedingungen erzeugten und in den Poren abgelagerten Ruß merklich ansteigt.

Wie die Grenzdruckkurven zeigen, verhalten sich die Werte für den niedrigsten Grenzdruck bei Acetylen/, Wasserstoff/, Propan/ und Methan/Sauerstoff-Gemischen etwa wie 1 : 2 : 3 : 4. Beim Acetylen liegt der niedrigste Grenzdruck beim Gemisch mit etwa 32 Vol % Acetylen (etwas überstöchiometrisch), beim Propan liegt er beim Gemisch mit



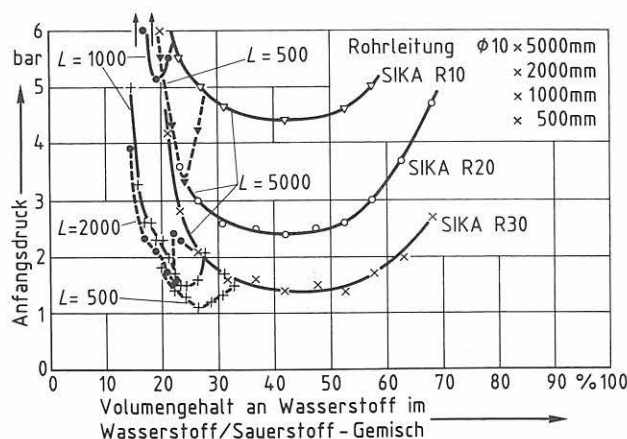
etwa 14 Vol % Propan (etwas unterstöchiometrisch), beim Methan liegt er beim Gemisch mit etwa 28 Vol % Methan (etwas mehr unterstöchiometrisch) und beim Wasserstoff schließlich beim Gemisch mit etwa 42 Vol % Wasserstoff (erheblich unterstöchiometrisch).

Bei Propan/, Methan/ und Acetylen/Sauerstoff-Gemischen wurde bei Versuchen mit der  $L = 5000$  mm und  $L = 1000$  mm langen Vorleitung etwa der gleiche Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Flammensperre ermittelt.

Bei Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen wurde bei Versuchen mit der  $L = 1000$  mm langen Vorleitung und Wasserstoffanteilen von weniger als 27 % bei gleicher Gemischzusammensetzung ein erheblich niedrigerer Grenzdruck ermittelt als bei Versuchen mit der  $L = 5000$  mm langen Vorleitung.

Der niedrigste Grenzdruck bei Gemischen mit Volumenanteilen von weniger als 27 % Wasserstoff und einer Rohrlänge von  $L = 1000$  mm liegt aber immer noch über dem niedrigsten Grenzdruck beim Gemisch mit 42 Vol % Wasserstoff, der bei Versuchen mit der  $L = 5000$  mm langen Rohrleitung ermittelt worden ist.

In dem Diagramm auf *Bild 27* sind die Ergebnisse weiterer Versuche zusammengestellt, die mit der Versuchsflammensperre und Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen ausgeführt worden sind. Eingesetzt wurden Sintermetalleinsätze der Qualität R 30, R 20 und R 10. Die Länge der Vorleitung betrug  $L = 5000$  mm, 2000 mm, 1000 mm und 500 mm. Die niedrigsten Grenzdrücke für die Flammendurchschlagsicherheit der Sperre wurden bei einer Länge der Vorleitung von  $L = 500$  mm und Volumenanteilen an Wasserstoff von 27 % und weniger erreicht. Mit dem bei Abnahme der Porenweite zunehmenden Grenzdruck verschiebt sich dieser niedrigste Grenzdruck zu geringeren Anteilen an Wasserstoff im Gemisch.



*Bild 27*  
Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Versuchsflammensperre DN 10 mit einem Sintermetalleinsatz der Qualität R 10, R 20 und R 30 bei der Reaktion von Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen und einer Länge der Vorleitung von  $L = 5000$ , 2000, 1000 und 500 mm

Durch die Diskussion der Ergebnisse der Versuche mit einer Reaktion von Wasserstoff/Luft-Gemischen konnte gezeigt werden, daß bei einer Sperrschicht aus Sintermetall der Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit durch vor der Reaktionsfront an der Sperrschicht eintreffende Stoßwellen ganz wesentlich heraufgesetzt wird. Diese Erhöhung beim Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit läßt nach bzw. kommt nicht mehr zustande bei Gemischen erheblich außerhalb der Detonationsgrenzbedingungen, bei denen entweder

- die Reaktionsfront erst dann an der Sperrschicht eintrifft, wenn die durch die vorgelaufenen Stoßwellen bewirkten, nur sehr kurzzeitig wirksamen Veränderungen beim Zustand der Gasphase in den Spalten der Sperrschicht nicht mehr wirksam sind oder
- die vor der Reaktionsfront eintreffenden Stoßwellen nur noch so schwach sind, daß es nicht mehr zu den für eine Erhöhung der Flammendurchschlagsicherheit der Sperrschicht erforderlichen Veränderungen beim Zustand der Gasphase in den Spalten der Sperrschicht kommen kann.

Welche Vorgänge sich dabei im einzelnen abspielen, kann vorerst aber nur vermutet werden.

Bei unterstöchiometrischen Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen tritt dieser Zustand, daß der Grenzdruck durch vorgelaufene Stoßwellen nicht mehr erhöht wird, bereits bei Gemischen auf, bei denen der Grenzdruck auch bei den Randbedingungen noch relativ niedrig ist, bei denen er durch vorgelaufene Stoßwellen erhöht wird, d. h. bei einer Länge der Vorleitung von zum Beispiel  $L = 5000$  mm und einer als Detonation einlaufenden Reaktionsfront.

Bei überstöchiometrischen Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen dagegen und bei unter- und überstöchiometrischen Methan/, Propan/ sowie Acetylen/Sauerstoff-Gemischen tritt dieser Zustand, daß der Grenzdruck nicht mehr durch vorgelaufene Stoßwellen erhöht werden kann, auch bei kurzen Rohrlängen erst bei Gemischen auf, bei denen der Grenzdruck bei den Randbedingungen bereits relativ hoch ist, bei denen er durch vorgelaufene Stoßwellen noch erhöht wird. Vergleiche dazu die Grenzdruckkurven für Methan/, Acetylen/ und Wasserstoff/Sauerstoff-Gemische auf *Bild 26* mit den entsprechenden Kurven für die Detonationsanlaufstrecke auf *Bild 25*. Dabei ist noch zu berücksichtigen, daß mit steigendem Anfangsdruck die Länge der Detonationsanlaufstrecke abnimmt (*Bild 17*) bzw. die Detonationsgrenzen sich bei unterstöchiometrischen Gemischen noch zu etwas brenngasärmeren und bei überstöchiometrischen Gemischen zu u. U. erheblich brenngasreicheren Gemischen hin verschieben.

In der *Tabelle 6* sind noch für die Modell-Flammensperre mit einem Sintermetalleinsatz der Qualität R 30 die Ergebnisse von Versuchen zusammengestellt, die mit Gemischen aus Methylacetylen/Propadien-Gemisch III und Sauerstoff ausgeführt worden sind.

Bei diesem Brenngasgemisch im Gemisch mit Sauerstoff und Sintermetall der Qualität R 30 liegt der niedrigste

Tabelle 6

Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Versuchsflammsperre mit einem Sintermetalleinsatz der Qualität R 30 bei der Reaktion von Mapp-Gas III/Sauerstoff-Gemisch

| Anfangsdruck<br>bar | Volumenanteil in % an Brenngas |                                      |      |      |      |       |      |     |
|---------------------|--------------------------------|--------------------------------------|------|------|------|-------|------|-----|
|                     | H <sub>2</sub><br>42 %         | Methylacetylen/Propadien-Gemisch III |      |      |      |       |      |     |
|                     | 13 %                           | 14 %                                 | 15 % | 16 % | 17 % | 18 %  | 19 % |     |
| 1,4                 | + ++                           |                                      |      |      |      |       |      |     |
| 1,45                | + -                            |                                      |      |      |      |       |      |     |
| 1,5                 | —                              |                                      |      |      |      |       |      |     |
| 2,0                 |                                | +                                    | +    |      |      |       | ++ + |     |
| 2,05                |                                | +++                                  | +++  | + +  | -+++ |       |      |     |
| 2,1                 |                                | ++++                                 | -+++ | -+++ | -+++ | -     | +++  |     |
| 2,15                |                                | —                                    | -    | -    | - -  | - + - | +    | -   |
| 2,2                 |                                | +                                    | -    |      |      |       |      | +++ |
| 2,3                 |                                | +++                                  | -    |      |      |       |      |     |
| 2,4                 |                                | + -                                  |      |      |      |       |      | -   |
| 2,5                 |                                | -                                    |      |      |      |       |      |     |

+ kein Flammendurchschlag

- Flammendurchschlag

Länge der Vorleitung L = 5000 mm

Grenzdruck um einen Faktor von etwa  $2,0/1,4 = 1,4$  höher als bei Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen bzw. um einen Faktor von  $2,0/0,7 = 2,8$  höher als bei Acetylen/Sauerstoff-Gemischen.

## 6.2 Versuche mit dem mit einer Flammsperre ausgerüsteten Gasrücktrittsventil DN 20

Der Aufbau für die Versuche mit dem durch eine Flammsperre geschützten Gasrücktrittsventil DN 20 ist auf dem Bild 28 skizziert. Als Flammsperre konnten Sintermetalleinsätze der Qualität R 50, R 30 und R 20 mit den Abmessungen  $\varnothing 50 \times \varnothing 40 \times 50$  mm eingesetzt werden. Für die Versuche wurde das Gasrücktrittsventil in Offenstellung blockiert.

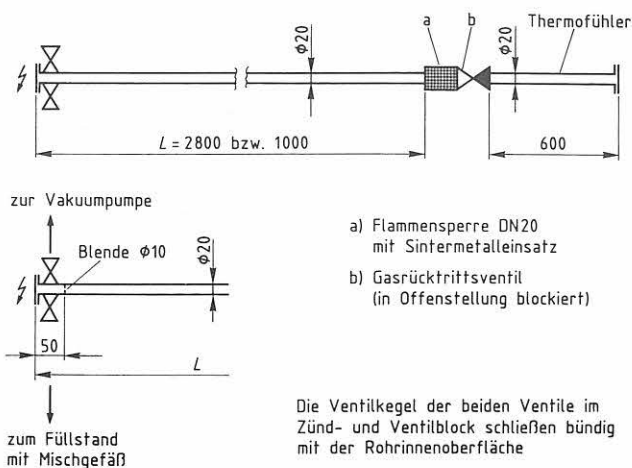


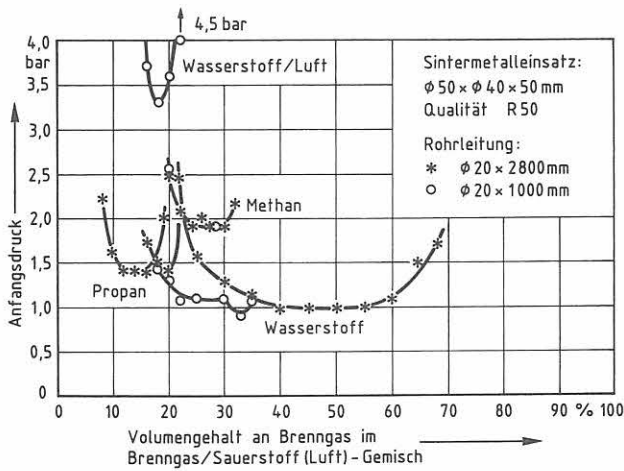
Bild 28

Aufbau für die Versuche mit dem mit einer Sintermetallflammsperre ausgerüsteten Gasrücktrittsventil DN 20

Der Flammsperre war eine L = 2 800 mm bzw. 1 000 mm lange Rohrleitung DN 20 vorgeschaltet und eine ca. 600 mm lange Rohrleitung DN 20 nachgeschaltet. Etwa 50 mm (2,5 Rohrdurchmesser) hinter dem Zündort konnte eine Blende mit 10 mm Innendurchmesser in die Vorleitung eingebaut werden. Durch den Einbau der Blende (Störstelle zur Erzeugung von zusätzlicher Turbulenz im Frischgas vor der Flammenfront) kann die Detonationsanlaufstrecke bei sonst gleichen Anfangsbedingungen erheblich verkürzt werden. Außerdem kommt die Reaktionsfront wegen der stärkeren Beschleunigung wesentlich schneller hinter den beim Reaktionsablauf gebildeten und vor der Flammenfront vorlaufenden Stoßwellen an dem Sintermetalleinsatz der Flammsperre an. Die Ventile zum Verschließen der Rohrleitung waren – wie bei der Rohrleitung DN 10 – so in den Zünd- und Ventilblock eingebaut, daß der Ventilkegel bündig mit der Rohrinneoberfläche abschließt. Dadurch wurden in der Nähe des Zündortes zusätzliche, mit reaktionsfähiger Gasphase gefüllte Volumina vermieden, die beim Einsatz normaler Ventile sonst im Ventilanschlußstutzen vorhanden sind. Bei den hier betrachteten kleinen Rohrdurchmessern haben solche zusätzliche, im Vergleich zum Rohrvolumen am Zündort bereits relativ große Nebenvolumina einen erheblichen Einfluß auf den Vorgang des Anlaufens einer Detonation.

Die Rohrleitung mit der eingebauten Flammsperre wurde wieder evakuiert und anschließend mit dem in einem Mischgefäß hergestellten Brenngas/Sauerstoff- bzw. Wasserstoff/Luft-Gemisch bis zum jeweils gewählten Versuchsdruck gefüllt. Die Zündung des Gemisches erfolgte am Anfang der vorgeschalteten Rohrleitung durch Durchschmelzen eines Metalldrahtes.

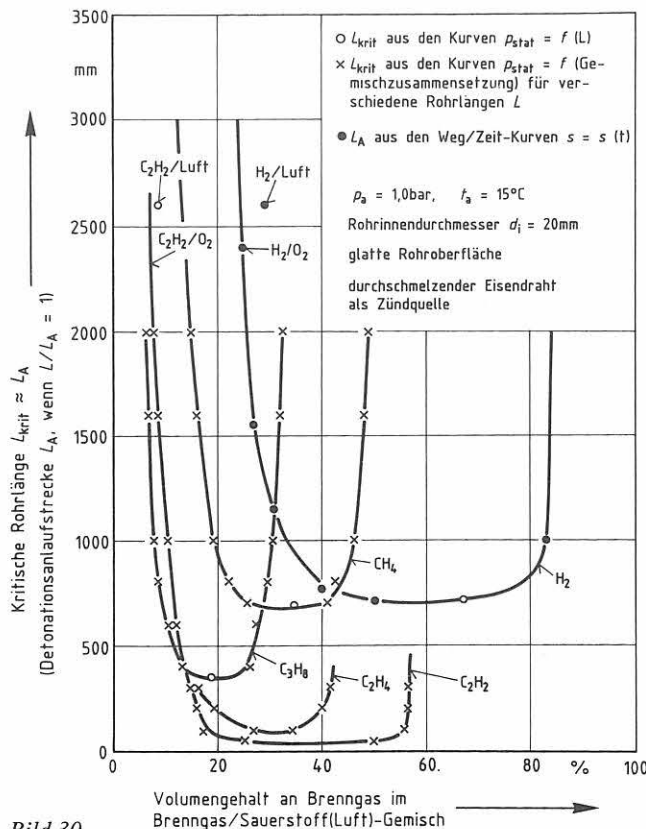
Ein Flammendurchschlag wurde wieder mit Hilfe eines Thermoelementes registriert, mit dem die bei einer Reaktion des Gemisches in der nachgeschalteten, relativ dünn-



**Bild 29**  
Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Flammensperre DN 20 mit Sintermetalleinsätzen der Qualität R 50 bei der Reaktion von Wasserstoff, Propanl und Methan/Sauerstoff-Gemischen sowie von Wasserstoff Luft-Gemischen und einer Länge der Vorleitung von  $L = 2800$  und  $1000$  mm

wandigen Rohrleitung bewirkte Erwärmung der Rohrwand gemessen wurde.

In dem Diagramm auf *Bild 29* sind die mit dem Gerät und Sintermetalleinsätzen der Qualität R 50 erhaltenen Ergebnisse zusammengestellt. Aufgetragen ist wieder der Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Flammensperre in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der



**Bild 30**  
Unter der Zusatzbedingung Länge der Rohrleitung gleich Länge der Detonationsanlaufstrecke ermittelte Detonationsanlaufstrecken für Acetylenl, Ethylenl, Propanl, Methanl und Wasserstoffl/Sauerstoff-Gemische von Atmosphärendruck und Raumtemperatur in Rohren DN 20

Wasserstoff/, Propan/ und Methan/Sauerstoff-Gemische bzw. der Wasserstoff/Luft-Gemische. Die niedrigsten Grenzdrücke verhalten sich bei den Brenngasen Wasserstoff, Propan und Methan und dem Einlaufen einer detonativ verlaufenden Reaktion etwa wieder wie 2 : 3 : 4.

Zur weiteren Interpretation der Versuchsergebnisse sind in dem Diagramm auf *Bild 30* für Acetylen/, Ethylen/, Propan/, Methan/ und Wasserstoff/Sauerstoff-Gemische von Atmosphärendruck und Raumtemperatur die nach einem vom Autor entwickelten Verfahren (8) ermittelten Detonationsanlaufstrecken in Rohren DN 20 zusammengestellt. Aufgetragen ist wieder die als kritische Rohrlänge bezeichnete, unter der Zusatzbedingung Länge der Rohrleitung gleich Länge der Detonationsanlaufstrecke ermittelte, Detonationsanlaufstrecke in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung. Die weiteren Randbedingungen waren : beidseitig geschlossene, glatte Rohrleitung mit 20 mm Innendurchmesser ohne jede Störstelle zur Erzeugung von zusätzlicher Turbulenz im Frischgas vor der Reaktionsfront, eine bei der Zündung ruhende Gasphase und Zündung durch einen durchschmelzenden Metalldraht am Anfang der Rohrleitung.

Mit Zunahme des Anfangsdruckes nimmt die Länge der Detonationsanlaufstrecke ab bzw. die Detonationsgrenzen verschieben sich bei den in Bezug auf den Brenngasanteil unterstöchiometrischen Gemischen zu etwas brenngasärmeren und bei überstöchiometrischen Gemischen zu u. U. erheblich brenngasreicheren Gemischen.

Bei Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen von Atmosphärendruck und Raumtemperatur ist in glatten Rohrleitungen DN 20 von 2800 mm Länge ohne Störstellen zur Turbulenzerzeugung bei Volumenanteilen von weniger als 23 % Wasserstoff nicht mehr mit dem Anlaufen einer Detonation zu rechnen. Bei einem Volumenanteil von 32 % Wasserstoff im Gemisch und den gleichen Randbedingungen (Atmosphärendruck, Raumtemperatur, glatte Rohrleitung DN 20 ohne Störstellen) beträgt die Länge der Detonationsanlaufstrecke  $L_A = L_{krit}$  etwa 1000 mm.

Bei der 1000 mm langen Rohrleitung nimmt die Erhöhung des Grenzdruckes durch die vor der Reaktionsfront eintreffenden Stoßwellen bei Volumengehalten von weniger als 30 % Wasserstoff mit Abnahme des Wasserstoffgehaltes immer mehr ab. Die mit der 1000 mm langen Vorleitung ermittelte Grenzdruckkurve bleibt deshalb mit Abnahme des Wasserstoffanteils zunehmend weiter unterhalb der Grenzdruckkurve, die mit der 2800 mm langen Vorleitung ermittelt worden ist.

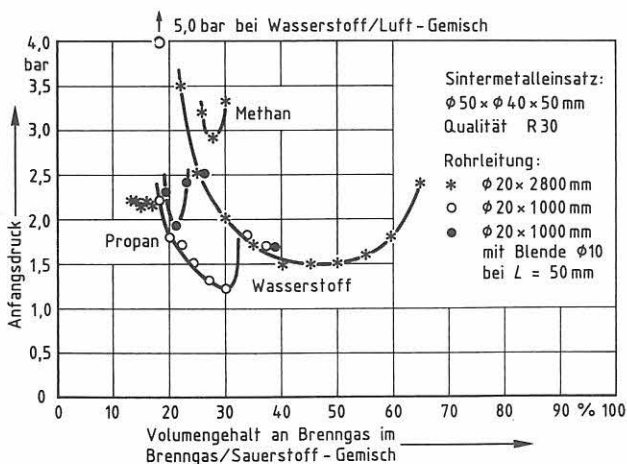
Auch bei der 2800 mm langen Vorleitung kommt es bei Gemischen mit Volumengehalten von 20 % und weniger Wasserstoff dann aber offensichtlich nicht mehr zu einer Erhöhung des Grenzdruckes durch die vor der Reaktionsfront an der Sperrschicht eintreffenden Stoßwellen, wodurch der starke Abfall des Grenzdruckes von 2,5 bar beim Gemisch mit 22 % Volumenanteilen Wasserstoff auf 1,4 bar beim Gemisch mit nur 20 % Volumenanteilen Wasserstoff erklärt werden kann.

Der beim Versuch mit der 1 000 mm langen Vorleitung und dem Gemisch mit 32 % Volumenanteilen Wasserstoff ermittelte niedrige Grenzdruck resultiert wahrscheinlich daraus, daß hier die Sicherung etwa am Umschlagspunkt zur Detonation an die Vorleitung angeschlossen war und dadurch stärkere Veränderungen des Anfangszustandes der Gasphase (Druck, Temperatur usw.) in den Spalten der Sperrschicht zum Zeitpunkt des Eintreffens der Reaktionsfront an der Sperrschicht vorgelegen haben.

Bemerkenswert ist vielleicht auch noch, daß bei den gleichen geometrischen Randbedingungen der für Wasserstoff/Luft-Gemische ermittelte Grenzdruck mehr als doppelt so hoch ist wie der Grenzdruck beim Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch mit dem gleichen Volumenanteil an Wasserstoff (18 Vol-%). Dies resultiert aus der größeren laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit von Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen gegenüber Wasserstoff/Luft-Gemischen mit gleichem Volumengehalt an Wasserstoff (11). Mit Zunahme der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit der Gasphase nimmt die flammendurchschlagsichere Grenzspaltweite ab (5).

Der bei Wasserstoff/Luft-Gemischen mit 20 % Volumenanteilen und mehr Wasserstoff beobachtete Anstieg beim Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit des Sintermetalleinsatzes muß dann wieder durch Stoßwellen verursacht worden sein, die bei den hier vorliegenden Drücken dann auch in der 1 000 mm langen Vorleitung DN 20 ohne Störstellen zur Turbulenzerzeugung beim Ablauf der Reaktion gebildet werden und vor der Flammenfront an der Sperrschicht eintreffen. Ohne diese Stoßwellen würde der niedrigste Grenzdruck bei Gemischen mit 27 bis 30 % Volumenanteilen Wasserstoff liegen.

In dem Diagramm auf *Bild 31* sind die mit der Flammensperre DN 20 und Sintermetalleinsätzen der Qualität R 30 erhaltenen Ergebnisse zusammengestellt. Aufgetragen ist wieder der Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Flammensperre in Abhängigkeit von der



*Bild 31*

Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Flammensperre DN 20 mit Sintermetalleinsätzen der Qualität R 30 bei der Reaktion von Wasserstoff, Propan/ und Methan/Sauerstoff-Gemischen sowie von Wasserstoff/Luft-Gemischen und einer Länge der Vorleitung  $L = 2800$  mm und  $1000$  mm

Zusammensetzung der Wasserstoff/, Propan/ und Methan/Sauerstoff-Gemische sowie der niedrigste Grenzdruck bei Wasserstoff/Luft-Gemischen. Auch hier verhalten sich die niedrigsten Grenzdrücke bei den Brenngasen Wasserstoff, Propan und Methan und dem Einlaufen einer detonativ verlaufenden Reaktion in erster Näherung wieder wie 2 : 3 : 4.

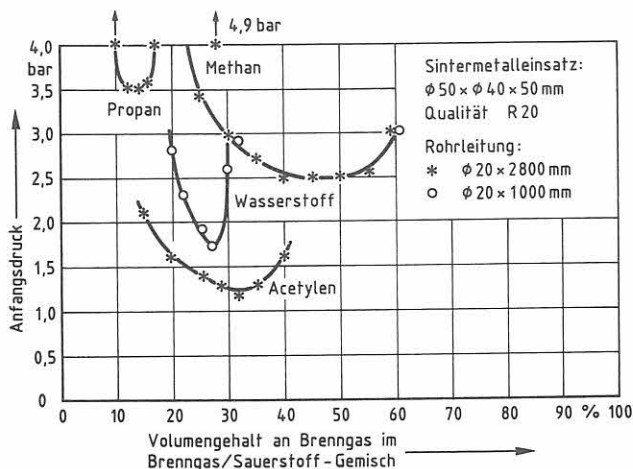
Auch hier ist der bei gleichen geometrischen Randbedingungen für Wasserstoff/Luft-Gemische ermittelte Grenzdruck wieder mehr als doppelt so hoch wie der Grenzdruck beim Wasserstoff/ Sauerstoff-Gemisch mit dem gleichen Volumengehalt an Wasserstoff.

Mit der 1000 mm langen Vorleitung sind jetzt auch Versuche ausgeführt worden, bei denen zur Beschleunigung des Reaktionsablaufes kurz hinter dem Zündort eine Blende in die Rohrleitung eingebaut war. Dadurch wird erreicht, daß der Grenzdruck bereits bei Gemischen mit mehr als 21 % Volumenanteilen Wasserstoff durch vorlaufende Stoßwellen stark angehoben werden kann. Wird die Blende nicht eingebaut, dann kann der Grenzdruck erst bei deutlich höheren Anteilen an Wasserstoff im Gemisch durch vorlaufende Stoßwellen stärker angehoben werden.

Die niedrigen Grenzdrücke bei 28 % und 30 % Volumenanteilen Wasserstoff im Gemisch sind aber wahrscheinlich wieder darauf zurückzuführen, daß hier die Flammensperre etwa am Umschlagspunkt zur Detonation in die Rohrleitung eingebaut ist, d. h. daß hier die Reaktionsfront beim Eintreffen an der Sperrschicht in deren Spalten auf eine Gasphase mit stark verändertem Anfangszustand (Druck, Temperatur, Turbulenz usw.) trifft, wodurch auch eine Abnahme beim Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Sperrschicht bewirkt wird.

Die beiden hier betrachteten Einflüsse auf den Grenzdruck, d. h. die Abnahme des Grenzdruckes beim Fehlen vorlaufender Stoßwellen bzw. beim Nachlassen der Wirkungen vorgelaufener Stoßwellen und die Abnahme des Grenzdruckes durch starke Änderungen des Gaszustandes zum Zeitpunkt des Eintreffens der Reaktionsfront an der Sperrschicht ( die stärksten Änderungen im Zustand der Gasphase zum Zeitpunkt des Eintreffens der Reaktionsfront liegen dann vor, wenn die Sperre am Umschlagspunkt zur Detonation in die Rohrleitung eingebaut ist) können hier nicht so richtig getrennt werden. Auffällig ist aber, daß es bei den Versuchen mit Gemischen mit Volumenanteilen von 25 % und weniger Wasserstoff zu sehr gut reproduzierten Werten für den Grenzdruck gekommen ist (bei Drücken von 0,1 bar über den Drücken auf der Grenzdruckkurve ist es immer zu einem Flammendurchschlag gekommen). Bei den Versuchen mit einem Gemisch mit 28 % bzw. 30 % Volumenanteilen Wasserstoff war dies dann nicht mehr der Fall. Hier ist es bei den ausgeführten Versuchen einige Male auch bei Drücken deutlich über der Grenzdruckkurve nicht zu einem Flammendurchschlag gekommen.

In dem Diagramm auf *Bild 32* sind schließlich noch die mit der Flammensperre DN 20 und Sintermetalleinsätzen der Qualität R 20 erhaltenen Ergebnisse zusammengestellt. Aufgetragen ist der Grenzdruck für die Flammendurch-

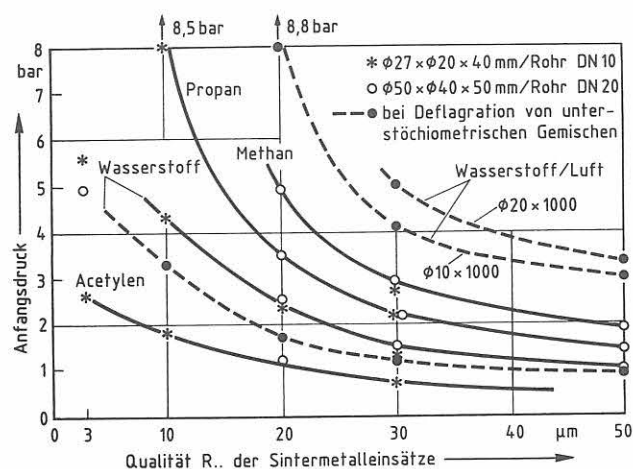


**Bild 32**  
 Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Flammensperre DN 20 mit Sintermetalleinsätzen der Qualität R 20 bei der Reaktion von Wasserstoff, Acetylen, Propan und Methan/Sauerstoff-Gemischen und einer Länge der Vorleitung  $L = 2800 \text{ mm}$  und  $1000 \text{ mm}$

schlagsicherheit der Flammensperre in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Acetylen-, Wasserstoff-, Propan- und Methan/Sauerstoff-Gemische. Auch hier verhalten sich die niedrigsten Grenzdrücke bei den Brenngasen Acetylen, Wasserstoff, Propan und Methan und beim Einlaufen einer Detonation in erster Näherung wieder wie 1 : 2 : 3 : 4.

### 6.3 Zusammenfassung

In dem Diagramm auf **Bild 33** sind die bei den Versuchsreihen für die eingesetzten Brenngas/Sauerstoff-Gemische und für Wasserstoff/Luft-Gemische ermittelten niedrigsten Grenzdrücke für die Flammendurchschlagsicherheit der Flammensperre DN 10 und DN 20 in Abhängigkeit von der Qualität R des Materials der Sintermetalleinsätze, d. h. von der größten Spaltweite im Sintermaterial zusammengestellt.



**Bild 33**  
 Niedrigster Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Flammensperre DN 10 und DN 20 in Abhängigkeit von der Qualität R des Materials der Sintermetalleinsätze für Brenngas/Sauerstoff-Gemische mit den angegebenen Brenngasen bzw. für Wasserstoff/Luft-Gemische

Damit kann dann abgeschätzt werden, bis zu welchem Druck (in bar absolut) von Flammensperren mit Sintermetalleinsätzen einer bestimmten Qualität R Flammendurchschläge bei einem Flammenrückschlag in Brenngas/Sauerstoff-Gemischen bei einem bestimmten Brenngas bzw. in Wasserstoff/Luft-Gemischen mit Sicherheit verhindert werden können.

In der **Tabelle 7** sind die Brenngas/Sauerstoff-Gemische mit dem größten Flammendurchschlagsvermögen durch Sperrschichten aus Sintermetall zusammengestellt, d. h. die Brenngas/Sauerstoff-Gemische, die bei der Prüfung auf Flammendurchschlagsicherheit von Flammensperren mit einer Sperrschicht aus Sintermetall eingesetzt werden müssen.

In dem Diagramm auf **Bild 34** sind noch die Ergebnisse von Versuchen zusammengestellt, bei denen für die Ver-

| Brenngas     | Brenngas im Brenngas/Sauerstoff-Gemisch | nach Literaturangabe bzw. nach Ergebnissen dieser Untersuchungen | stöchiom. Gemisch |
|--------------|---|--|-------------------|
|              | Vol.-%                                  |  |                   |
| Wasserstoff  | 45*                                     | diese Untersuchungen   | 66,7              |
| Acetylen     | 32                                      | diese Untersuchungen   | 28,6              |
| Ethylen      | 23                                      | diese Untersuchungen   | 25,0              |
| Propylen     | 16                                      | diese Untersuchungen   | 18,2              |
| Propan       | 13,5                                    | (13)   | 16,7              |
|              | 14                                      | diese Untersuchungen   |                   |
| Methan       | 26                                      | (14)   | 33,3              |
|              | 28                                      | diese Untersuchungen   |                   |
| Mapp-Gas III | 18                                      | diese Untersuchungen   |                   |

**Tabelle 7**  
 Brenngas/Sauerstoff-Gemische mit dem größten Flammendurchschlagsvermögen durch Sperrschichten aus Sintermetall

\*) Bei Wasserstoff als Brenngas ergibt sich für Sperrschichten aus Sintermetall bei einer nur als Deflagration aus einer kurzen Rohrleitung DN 10 mit z. B.  $L = 500 \text{ mm}$  Länge einlaufenden Reaktionsfront bei Gemischen mit nur 20 bis 25 % Volumenanteilen Wasserstoff u. U. ein erheblich niedrigerer Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit als bei diesem Gemisch und einer aus einer längeren Rohrleitung als Detonation einlaufenden Reaktionsfront.

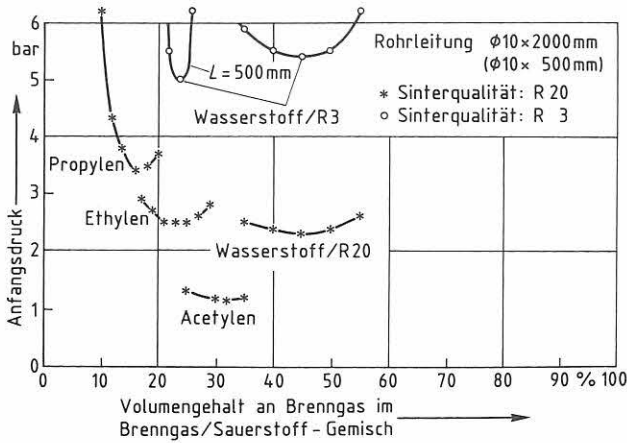


Bild 34

Grenzdruck für Flammendurchschlagsicherheit der Versuchsflammsperre DN 10 mit einem Sintermetalleinsatz der Qualität R 20 bzw. R 3 bei der Reaktion von Acetylen/ Ethylen/ Propylen/ und Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen und einer Länge der Vorleitung von  $L = 5000$  und  $500$  mm

suchsflammsperre DN 10 mit einer Sperrschicht aus Sintermetall der Qualität R 20 u. a. auch noch der Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit bei Flammrückschlägen in Ethylen/Sauerstoff- und Propylen/ Sauerstoff-Gemischen ermittelt worden ist. Bei den Versuchen mit Ethylen/Sauerstoff-Gemischen wurde ein geringfügig höherer niedrigster Grenzdruck ermittelt als bei Versuchen mit Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen (Faktor von  $1,1 = 2,5 \text{ bar} / 2,3 \text{ bar}$ ). Bei Propylen/Sauerstoff-Gemischen ergibt sich ein etwa gleichgroßer niedrigster Grenzdruck wie bei Propan/Sauerstoff-Gemischen (Vergleiche mit Angaben für Propan/Sauerstoff-Gemische in Bild 33).

## 7. Untersuchungen über die Dauer der Nachbrandsicherheit von Sperrschichten aus Sintermetall

### 7.1 Angaben zum Versuchsaufbau und zur Versuchsdurchführung

Auf dem Bild 35 ist der Versuchsaufbau skizziert, mit dessen Hilfe Untersuchungen über die Dauer der Nachbrandsicherheit von Flammsperreneinsätzen aus Sintermetall ausgeführt werden sind. Eingesetzt wurden Sintermetalleinsätze der Qualität R 20 und R 3 mit den Abmessungen  $\varnothing 27 \times \varnothing 20 \times 40$  mm. Auf dem Bild 6 ist bereits die bei einem Teil dieser Nachbrandversuche eingesetzte Versuchsflammsperre gezeigt worden. Durch die bei dieser Versuchsflammsperre gewählte Art der Verspannung ohne ein den Sintermetalleinsatz umschließendes Gehäuse konnte die durch den Einsatz strömende Gasphase direkt an der Sintermetalloberfläche gezündet werden. Einige Nachbrandversuche wurden auch mit der auf dem Bild 5 gezeigten Versuchsflammsperre ausgeführt, bei denen die

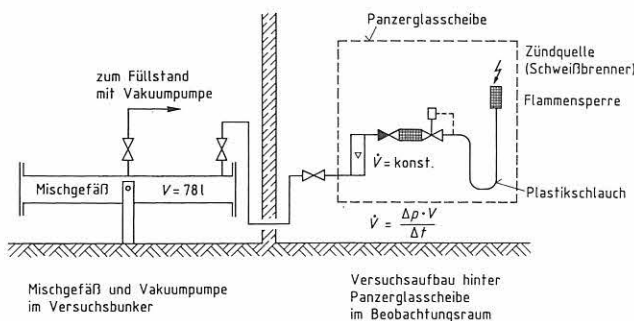


Bild 35

Versuchsaufbau zur Durchführung von Nachbrandversuchen

Gasphase durch die Flamme eines Schweißbrenners gezündet worden ist, der am Sperrenaussgang bzw. am Ende eines der Sperre nachgeschalteten,  $300$  mm langen Rohres DN 10 angeordnet war.

Es sind Versuche mit Gemischen in stöchiometrischer Zusammensetzung aus Acetylen mit Sauerstoff oder Luft und aus Wasserstoff mit Sauerstoff oder Luft ausgeführt worden. Variiert wurde der Gemischvolumenstrom. Die Anfangsbedingungen waren Atmosphärendruck und Raumtemperatur.

Das jeweilige Gemisch ist einem Mischgefäß entnommen worden, in dem es vorher hergestellt worden war. Mit Hilfe eines Regelventils und eines Schwebekörperdurchflußmessers wurde der Gemischvolumenstrom über die Dauer der Nachbrandzeit konstant gehalten. Der tatsächliche Gemischvolumenstrom ist bei Vorversuchen durch Ausströmen der hier eingesetzten Brenngas/Sauerstoff- bzw. Brenngas/Luft-Gemische bei verschiedenen Stellungen des Schwebekörpers ermittelt worden. Er ist berechnet worden aus dem Volumen  $V$  des Mischgefäßes, der Ausströmzeit  $\Delta t$  und dem danach gemessenen Druckabfall  $\Delta p$  im Mischgefäß zu  $\dot{V} = \Delta p \times V / \Delta t$ .

Ein Flammendurchschlag konnte visuell im Plastikschilauch vor der Versuchsflammsperre beobachtet werden. Der Schwebekörperdurchflußmesser wurde mit Hilfe einer Gebrauchsstellenvorlage abgesichert, die mit einer druck- und einer temperaturgesteuerten Nachströmsperre ausge-

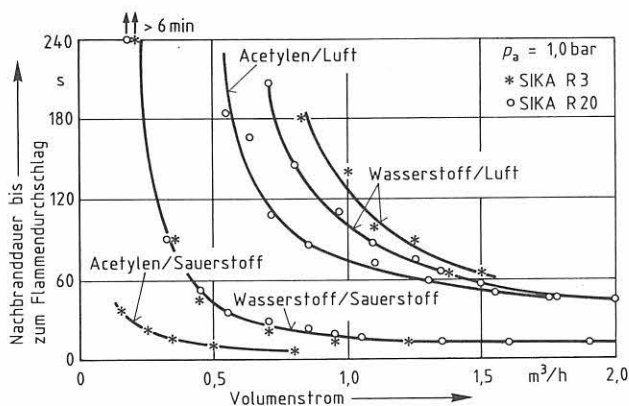
rüstet war. Bei einem Flammendurchschlag wurde das Ventil vor dem Schwebekörperdurchflußmesser von Hand geschlossen.

Während die druckgesteuerte Nachströmsperre in der Gebrauchsstellenvorlage zur Absicherung des Schwebekörperdurchflußmessers bei einem Flammendurchschlag nach einem Nachbrand von Acetylen/Sauerstoff-Gemisch immer geschlossen hat, hat sie bei einem Flammendurchschlag nach einem Nachbrand von Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch nie geschlossen.

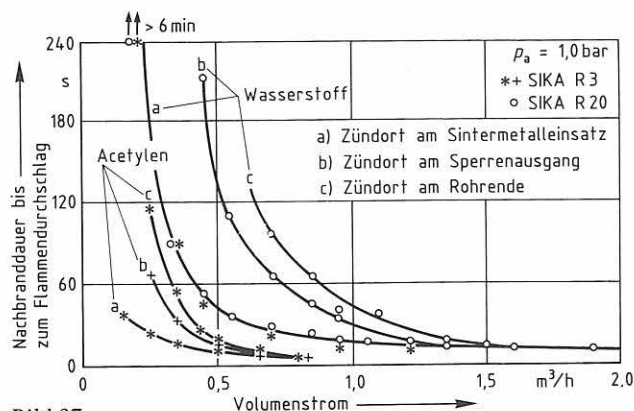
## 7.2 Versuchsergebnisse und Diskussion der Ergebnisse

In den Diagrammen auf den *Bildern 36 und 37* sind die Ergebnisse der Nachbrandversuche zusammengestellt. Aufgetragen ist die Nachbranddauer bis zum Flammendurchschlag in Abhängigkeit vom Volumenstrom.

Beim Wasserstoff/Luft-Gemisch wurde bei den Versuchen mit dem feinporigeren Sintermetalleinsatz (Qualität R 3) eine etwas längere Nachbranddauer bis zum Flammendurchschlag ermittelt. Beim Wasserstoff/Sauerstoff-



**Bild 36**  
Nachbranddauer bis zum Flammendurchschlag bei Versuchen mit Sintermetalleinsätzen  $\varnothing 27 \times \varnothing 20 \times 40 \text{ mm}$  und stöchiometrischem Gemisch aus Acetylen und Sauerstoff oder Luft bzw. aus Wasserstoff und Sauerstoff oder Luft bei Atmosphärendruck



**Bild 37**  
Nachbranddauer bis zum Flammendurchschlag bei Versuchen mit Sintermetalleinsätzen  $\varnothing 27 \times \varnothing 20 \times 40 \text{ mm}$  und stöchiometrischem Acetylen/Sauerstoff- bzw. Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck bei Variation des Zündortes

misch konnte ein solcher Einfluß der Porenweite auf die Dauer der Nachbrandsicherheit nicht festgestellt werden.

Wird die strömende Gasphase nicht direkt am Sintermetalleinsatz, sondern am Gasausgang des Gehäuses bzw. an der Öffnung eines der Sperre nachgeschalteten, 300 mm langen Rohrteiles gezündet, dann ergibt sich bei kleineren Volumenströmen mit Abnahme des Volumenstromes eine zunehmend längere Dauer der Nachbrandsicherheit bis zum Flammendurchschlag (siehe Bild 37). Diese Zunahme der Nachbranddauer resultiert daraus, daß es bei Abnahme des Volumenstromes zunehmend länger dauert, ehe sich die immer wieder erneut in das Gehäuse einlaufende Reaktionsfront am Flammensperreinsatz stabilisieren kann.

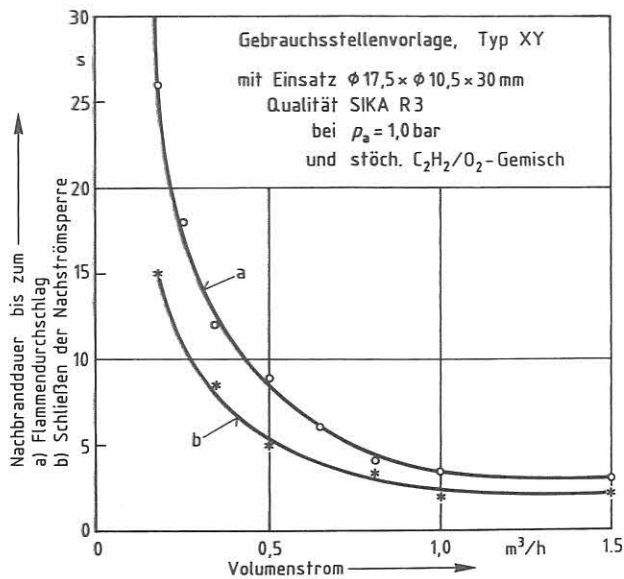
Bei größeren Volumenströmen kann es auch bereits beim ersten Einlaufen der Reaktionsfront in das Sperrgehäuse sofort zu einem Nachbrand der strömenden Gasphase am Sintermetalleinsatz kommen.

Kommt es bei Brenngas/Sauerstoff-Gemischen und größeren Volumenströmen nach dem Einlaufen der Reaktionsfront zu einem Nachbrand am Sintermetalleinsatz, dann muß bei den hier gewählten Abmessungen für den Einsatz von  $\varnothing 27 \times \varnothing 20 \times 40 \text{ mm}$  auch bei Atmosphärendruck bei Wasserstoff als Brenngas bereits nach einer Nachbranddauer von  $t \leq 11$  Sekunden und bei Acetylen als Brenngas sogar bereits nach einer Nachbranddauer von nur  $t \leq 6$  Sekunden mit einem Flammendurchschlag gerechnet werden. Mit Zunahme des Anfangsdruckes wird bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit und entsprechend größerem Volumenstrom die Dauer der Nachbrandsicherheit bis zum Flammendurchschlag noch weiter abnehmen.

Es zeigt sich hier, daß es nicht einfach sein dürfte, eine temperaturgesteuerte Nachströmsperre zu bauen, die bei einem Nachbrand von Brenngas/Sauerstoff-Gemisch und größeren Volumenströmen so schnell geschlossen wird, daß dadurch ein Flammendurchschlag als Folge des Nachbrandes verhindert werden kann. Andererseits müßte es aber möglich sein, temperaturgesteuerte Nachströmsperren zu bauen, die bei einem Nachbrand von Brenngas/Luft-Gemisch und allen Volumenströmen so schnell geschlossen werden, daß durch sie ein Flammendurchschlag als Folge eines Nachbrandes verhindert werden kann.

In dem Diagramm auf *Bild 38* ist für eine handelsübliche Gebrauchsstellenvorlage, Typ XY, mit einem Sintermetalleinsatz  $\varnothing 17,5 \times \varnothing 10,5 \times 30 \text{ mm}$  der Qualität R 3 für stöchiometrisches Acetylen/Sauerstoff-Gemisch von 1 bar Anfangsdruck die Nachbranddauer bis zum Flammendurchschlag bei blockierter Nachströmsperre und die Nachbranddauer bis zum Schießen der Nachströmsperre in Abhängigkeit vom Volumenstrom angegeben. Wie man sieht, konnte von diesem Gerät bei einem Bar Anfangsdruck und allen gewählten Volumenströmen durch ein ausreichend schnelles Schließen der Nachströmsperre ein Flammendurchschlag als Folge des Nachbrandes verhindert werden.

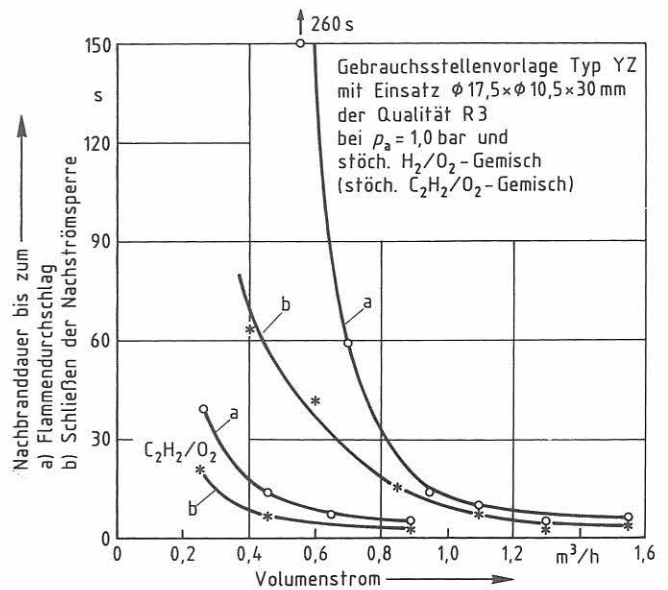
Es ist zu erwarten, daß mit Zunahme des Anfangsdruckes bei der Kurve a die Nachbranddauer bis zum Flammendurchschlag



**Bild 38**  
Nachbranddauer bis zum  
a) Flammendurchschlag und  
b) Schließen der Nachströmsperre  
bei Versuchen mit einer handelsüblichen Gebrauchsstellenvorlage und stöchiometrischem Acetylen/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck

durchschlag stärker abnehmen wird als die Nachbranddauer bis zum Schließen der Nachströmsperre bei der Kurve b. Dies wird dazu führen, daß auch bei diesem Gerät die Kurve b bei höheren Anfangsdrücken zumindest bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten (Volumenströmen) oberhalb der Kurve a verlaufen wird, so daß deshalb dann auch von diesem Gerät bei solchen Anfangsbedingungen und einem Nachbrand ein nachträglicher Flammendurchschlag nicht mehr verhindert werden kann.

Die Kurve b im Diagramm zeigt die Ergebnisse von sechs Versuchen mit sechs verschiedenen Prüfmustern. Die Kurve a zeigt die Ergebnisse von acht Versuchen mit nur einem Prüfmuster, bei dem die Nachströmsperre in Offenstellung blockiert worden war. Nach jedem dieser acht Versuche konnte nach dem Abkühlen des Musters auf Raumtemperatur der Verschlußdeckel des Gerätes um ca. 1/4 Umdrehung in das Gehäuse weiter eingeschraubt werden. Bei einer Steigung des Gewindes dieser Verschraubung von einem Millimeter bedeutet dies, daß der Sintermetalleinsatz beim Abkühlen von der Temperatur beim Flammendurchschlag auf Raumtemperatur in der Länge um ca. 0,25 mm kürzer geworden ist. Ohne ein erneutes Verspannen des Sintermetalleinsatzes im Gehäuse ist die Sicherheitseinrichtung bei einem erneuten Flammendurchschlag dann wahrscheinlich nicht mehr flammendurchschlagsicher. Deshalb sind Geräte mit einer temperaturgesteuerten Nachströmsperre, die nach dem Abkühlen des Gerätes beim Erreichen einer bestimmten Temperatur selbsttätig wieder öffnet, grundsätzlich nicht zu empfehlen. Nach einer stärkeren thermischen Belastung mit Auslösen der Nachströmsperre muß diese geschlossen bleiben. Soll die Sicherung weiter verwendet werden, muß sie beim Hersteller demontiert und wieder neu zusammengesetzt werden.



**Bild 39**  
Nachbranddauer bis zum  
a) Flammendurchschlag und  
b) Schließen der Nachströmsperre  
bei Versuchen mit einer handelsüblichen Gebrauchsstellenvorlage und stöchiometrischem Acetylen/Sauerstoff- und Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck

In dem Diagramm auf *Bild 39* ist noch für eine weitere handelsübliche Gebrauchsstellenvorlage, Typ YZ, mit einem Sintermetalleinsatz  $\varnothing 17,5 \times \varnothing 10,5 \times 30$  mm der Qualität R 3 sowohl für stöchiometrisches Acetylen/Sauerstoff-Gemisch als auch für stöchiometrisches Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch von 1 bar Anfangsdruck die Nachbranddauer a) bis zum Flammendurchschlag bei in Offenstellung blockierter Nachströmsperre und b) bis zum Schließen der Nachströmsperre in Abhängigkeit von Volumenstrom angegeben.

Bei beiden Gasphasen konnte von diesem Gerät bei einem 1 bar Anfangsdruck und den gewählten Volumenströmen durch ein ausreichend schnelles und „flammendurchschlagdichtes“ Schließen der Nachströmsperre ein Flammendurchschlag als Folge des Nachbrandes verhindert werden.

Bei den Flammendurchschlägen nach einem Nachbrand von Acetylen/Sauerstoff-Gemisch hat die druckgesteuerte Nachströmsperre in der Gebrauchsstellenvorlage zur Absicherung des Schwebekörperdurchflußmessers (Bild 35) immer geschlossen, bei den Flammendurchschlägen nach einem Nachbrand von Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch hat sie bei keinem Versuch geschlossen.

Eine weitere Beobachtung bei den Versuchen sollte vielleicht auch nicht unerwähnt bleiben. Bei keinem der Flammendurchschläge ist es nach dem „optischen Eindruck“ in der ca. 1500 mm langen Schlauchleitung DN 8 zwischen dem Prüfmuster und der Sicherung hinter dem Durchflußmeßgerät zum Anlaufen einer Detonation gekommen (kein blitzartiger Ablauf der Reaktion). Bei nicht strömendem, stöchiometrischem Acetylen/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck dagegen muß in einer beidseitig geschlossenen Rohrleitung DN 10 bereits nach einer An-



laufstrecke von wenigen Rohrdurchmessern mit einem detonativen Verlauf der Reaktion gerechnet werden (siehe dazu z. B. Bild 25). Damit kommt man zu der Feststellung, daß es gegen die Strömung bei stöchiometrischem Acetylen/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur bei Strömungsgeschwindigkeiten von

$w \geq 1,1$  m/s (kleinster Volumenstrom bei den Versuchen  $\dot{V} = 0,2$  m<sup>3</sup>/h, Schlauchinnendurchmesser  $d_i = 8$  mm) in einer beidseitig geschlossenen, 1,5 m langen Schlauch- bzw. Rohrleitung DN 8 noch nicht zum Anlaufen einer Detonation kommt, wenn die Zündung am Abströmende durch eine heiße Oberfläche (Sintermetalloberfläche) erfolgt.

## 8. Anforderungen an Sicherungen zur Absicherung von Entnahmestellen an Gasverteilungsleitungen beim Schweißen, Schneiden und bei verwandten Arbeitsverfahren

### 8.1 Allgemeines zur Problemstellung

Beim autogenen Schweißen, Schneiden und bei verwandten Arbeitsverfahren wird im Brenner Brenngas mit Sauerstoff gemischt und an der Brennermündung verbrannt. Bei einem defekten oder verstopften Brenner kann es – je nach den gerade vorliegenden Druckverhältnissen – zum Rücktritt von Sauerstoff in die Brenngasleitung bzw. von Brenngas in die Sauerstoffleitung kommen und dort zur Bildung von Brenngas/Sauerstoff-Gemischen führen. Deshalb müssen Entnahmestellen an Gasverteilungsleitungen durch sogenannte Gebrauchstellenvorlagen abgesichert werden. Bei Brennern, die aus Einzelflaschen versorgt werden, wird die Gasquelle durch eine sogenannte Einzelflaschensicherung abgesichert.

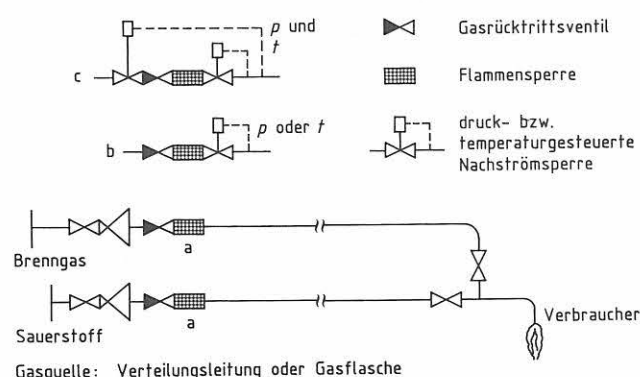
einer Einzelflasche als Gasquelle kann die Absicherung auch durch eine vor dem Absperrventil des Brenners am Brennerhandgriff angebrachte Sicherung erfolgen.

Bei dem hier betrachteten Anwendungsfall muß die jeweils eingesetzte Sicherung (Gebrauchstellenvorlage, Einzelflaschensicherung oder Brennerhandgriffsicherung) aus den folgenden beiden Sicherungselementen bestehen: aus einem Gasrücktrittsventil und einer Flammensperre. Außerdem muß das Gasrücktrittsventil auf der Gaseingangsseite durch einen Schmutzfilter vor Verschmutzung geschützt werden, damit es auch nach einer längeren Betriebszeit seine Funktion noch einwandfrei erfüllen kann.

### 8.2 Anforderungen an Gebrauchstellenvorlagen aufgrund der Systemanalyse

Auf dem *Bild 40* ist das System „Verteilungsleitung mit Entnahmestelle (bzw. Einzelflasche mit Entnahmestelle) – Gebrauchstellenvorlage (bzw. Einzelflaschensicherung) – Schlauchleitung - Brenner“ schematisch dargestellt. Bei

Wie man sich anhand der Skizze auf Bild 40 leicht klarmachen kann, muß bei einer Störung am Brenner bis zum Gasrücktrittsventil mit einer Bildung von Brenngas/Sauerstoff-Gemisch gerechnet werden. Bei einer Zündung des Gemisches würde das Gasrücktrittsventil durch die Reaktionsfront einer möglicherweise detonativ verlaufenden Reaktion von Brenngas/Sauerstoff-Gemisch beansprucht werden. Bei einer solchen extremen Belastung muß mit einer Verformung von Bauteilen des Gasrücktrittsventils gerechnet werden. Es könnte danach einen Gasrücktritt wahrscheinlich nicht mehr verhindern. Deshalb muß das Gasrücktrittsventil durch Vorschalten einer wirksamen Flammensperre vor einer derartigen Belastung geschützt werden.



Die Flammensperre muß bei ruhendem Gemisch und dem Gemisch mit dem größten Flammendurchschlagsvermögen einen Flammendurchschlag verhindern können. Strömt entweder Brenngas oder Sauerstoff durch die jeweilige Sicherung, dann kann an der Sicherung kein Brenngas/Sauerstoff-Gemisch mehr vorliegen, da vor dem Gasrücktrittsventil entweder nur reines Brenngas bzw. nur reiner Sauerstoff ansteht. Eine Prüfung der Flammensperre auf Flammendurchschlagsicherheit mit strömendem Brenngas/Sauerstoff-Gemisch ist deshalb bei diesem Anwendungsfall nicht erforderlich. Es kann auch nicht zu einer Belastung der Flammensperre durch einen Nachbrand von strömendem Brenngas/Sauerstoff-Gemisch kommen.

*Bild 40*  
System „Gasquelle - Gebrauchstellenvorlage - Schlauchleitung - Brenner“

Allenfalls bei Acetylen als Brenngas könnte es nach dem Einlaufen der Reaktionsfront zu einem an der Flammen-

sperre stehenden Zerfall von nachströmendem reinen Acetylen kommen. Bei den hier betrachteten Sicherheitseinrichtungen werden als Flammensperre üblicherweise hohlzylindrische Sintermetalleinsätze eingesetzt, die von innen nach außen von dem Brenngas durchströmt werden (siehe dazu die Versuchsflammensperre auf Bild 4 bzw. 5). Der Spalt zwischen der Sintermetalloberfläche und der Gehäusewand beträgt im allgemeinen weniger als drei Millimeter. Bei diesen Abmessungen und dem bei Acetylen maximal zulässigen Druck von 2,5 bar (1,5 bar Überdruck) kann es nach allen bisher vorliegenden Erfahrungen aus Versuchen mit einem Acetylenzerfall aber nicht zu einem in der Sicherheitseinrichtung stehenden Zerfall von strömendem Acetylen kommen.

Wie auf dem Bild 40 skizziert, werden zur Absicherung von Entnahmestellen an Gasverteilungsleitungen nicht nur Gebrauchsstellenvorlagen eingesetzt, die aus einem Gasrücktrittsventil und einer Flammensperre bestehen. Es werden überwiegend Gebrauchsstellenvorlagen eingesetzt, die aus einem Gasrücktrittsventil, einer Flammensperre und einer Nachströmsperre bestehen. Dabei gibt es Geräte mit druckgesteuerter Nachströmsperre, Geräte mit temperaturgesteuerter Nachströmsperre und Geräte mit einer druckgesteuerten und einer temperaturgesteuerten Nachströmsperre (wie bei der Absicherung des Schwebekörperdurchflußmessers auf Bild 35 eingesetzt).

Solange diese Geräte zur Absicherung von Entnahmestellen beim Schweißen, Schneiden und bei verwandten Arbeitsverfahren eingesetzt werden, haben diese Nachströmsperren im Grunde keine Bedeutung. Es sei denn, daß in dem System vor dem Gerät ein Brenngas/Luft-Gemisch anstehen kann. Damit muß u. U. dann gerechnet werden, wenn bei der ersten Inbetriebnahme der Anlage bzw. bei ihrer Wiederinbetriebnahme nach einer Reparatur die in der Anlage vorhandene Luft nicht mit einem Inertgas ausgespült worden ist, sondern mit dem jeweiligen Brenngas ausgespült wird.

Werden diese Geräte dagegen auch zur Absicherung eines Gasmischers oder zur Absicherung eines Gerätes zur elektrolytischen Zersetzung von Wasser als Gasquelle für Mikro-Löt- und Schweißgeräte (15) eingesetzt, dann muß die Nachströmsperre eine wichtige Funktion übernehmen.

### 8.3 Anforderungen an Sicherheitseinrichtungen zur Absicherung von Gasmischern bzw. von Geräten zur elektrolytischen Zersetzung von Wasser als Gasquelle für Mikro-Löt- und Schweißgeräte

Auf dem Bild 41 sind die zur Absicherung eines Gasmischers zur Herstellung von Brenngas/Sauerstoff- bzw. Brenngas/Luft-Gemischen erforderlichen Sicherheitseinrichtungen skizziert. Die Gaszuführungsleitungen müssen mit den oben beschriebenen Gebrauchsstellenvorlagen ab-

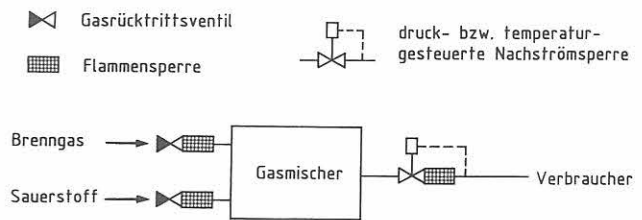


Bild 41  
Absicherung eines Gasmischers

gesichert werden. Auf der Gasausgangsseite muß der Gasmischer gegen Flammenrückschläge vom Verbraucher her mit einer Sicherheitseinrichtung abgesichert werden, die mit einer Flammensperre und einer Nachströmsperre ausgerüstet ist. Werden hier Sicherheitseinrichtungen eingesetzt, die zusätzlich noch mit einem Gasrücktrittsventil ausgerüstet sind, so hat dieses Gasrücktrittsventil keine wesentliche Funktion.

Wie bei einer Gebrauchsstellenvorlage, so muß auch hier die Flammensperre bei ruhendem Gemisch und dem Gemisch mit dem größten Flammendurchschlagsvermögen einen Flammendurchschlag verhindern können.

Erfahrungsgemäß kann eine Flammensperre beim ersten Einlaufen der Reaktionsfront auch bei Versuchen mit strömendem Gemisch zunächst einen Flammendurchschlag verhindern, wenn sie beim gleichen Gemisch und Versuchen mit ruhendem Gemisch einen Flammendurchschlag verhindert. Erst wenn es bei Versuchen mit strömendem Gemisch nach dem Einlaufen der Reaktionsfront nicht zu einem Abbruch der Reaktion sondern zu einem Nachbrand des strömenden Gemisches an dem Sintermetalleinsatz kommt, muß nach einer u. U. sehr kurzen Nachbranddauer mit einem nachträglichen Flammendurchschlag durch die Sicherung gerechnet werden, wie die Ergebnisse der Nachbrandversuche im Abschnitt 7.2 gezeigt haben.

Eine druckgesteuerte Nachströmsperre kann nur dann geschlossen werden, wenn der Druckimpuls der einlaufenden Reaktionsfront zum Lösen ihrer Arretierung ausreicht. Unter Bedingungen, unter denen die Reaktionsfront als Detonation in die Sicherung einläuft, wird die Arretierung sicher immer gelöst werden, und die Nachströmsperre wird geschlossen. Unter diesen Bedingungen kommt es erfahrungsgemäß aber auch immer zu einem Abbruch der Reaktion am Flammensperreneinsatz und damit nicht zu einem Nachbrand.

Kommt es aufgrund der vorliegenden Bedingungen wie z. B. bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten (Volumenströmen) nur zu einer ohne größeren Druckimpuls einlaufenden Reaktionsfront, dann wird die Arretierung der druckgesteuerten Nachströmsperre nicht gelöst, sie wird nicht geschlossen und im Falle eines Nachbrandes kommt es dann auch zu einem Flammendurchschlag.

Bei den in den Geräten eingesetzten temperaturgesteuerten Nachströmsperren muß die Arretierung eines federbelasteten Ventils durch Temperatureinwirkung gelöst werden. Entweder muß (wie beim Gerät Typ YZ bei den Nachbrand-

versuchen im Kapitel 7.2) eine mit einem niedrigschmelzenden Lot hergestellte Lötverbindung zwischen zwei Bauteilen soweit aufgeschmolzen werden oder es müssen (wie beim Gerät Typ XY bei den Nachbrandversuchen im Kapitel 7.2) Teile eines Kunststoffstopfens soweit erweicht werden, daß dadurch die Arretierung unter dem Druck der vorgespannten Feder gelöst wird, und das Ventil geschlossen werden kann.

## 8.4 Schlußfolgerungen

### 8.4.1 Für die Prüfung von Gebrauchsstellenvorlagen und Einzelflaschensicherungen beim Schweißen, Schneiden und bei verwandten Arbeitsverfahren

Nach der Systemanalyse im Kapitel 8.2 müssen Gebrauchsstellenvorlagen und Einzelflaschensicherungen zur Absicherung von Entnahmestellen beim Schweißen, Schneiden und bei verwandten Arbeitsverfahren aus den beiden Sicherungselementen Gasrücktrittsventil und Flammensperre bestehen (siehe dazu auch TRAC 207 und 401 (16), DIN 8521 (17), EN 730 (18) und ISO 5175 (19)). Muß damit gerechnet werden, daß vor dem Gasrücktrittsventil auch ein Brenngas/Luft-Gemisch anstehen kann, dann muß das Gerät zusätzlich noch mit einer temperaturgesteuerten Nachströmsperre ausgerüstet sein, die bei einem Nachbrand des Brenngas/Luft-Gemisches am Flammensperreneinsatz einen nachträglichen Flammendurchschlag als Folge des Nachbrandes verhindert.

Das Gasrücktrittsventil muß vor und nach der Flammrückschlagprüfung auf Sicherheit gegen Gasrücktritt geprüft werden.

Die Flammensperre muß beim maximalen Betriebsdruck mit bei der Zündung ruhendem Gemisch auf Flammendurchschlagsicherheit geprüft werden. Dabei muß das Brenngas/Sauerstoff-Gemisch mit dem größten Flammendurchschlagsvermögen durch Sperrschichten aus Sintermetall eingesetzt werden.

In der Tabelle 7 sind für die beim Schweißen und Schneiden eingesetzten Brenngase die Brenngas/Sauerstoff-Gemische mit dem größten Flammendurchschlagsvermögen zusammengestellt, d. h. die Gemische, bei denen nach Literaturangaben und nach den Ergebnissen dieser Untersuchungen bei der Prüfung mit dem niedrigsten Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Flammensperren gerechnet werden muß.

Bei Wasserstoff als Brenngas kann es bei Gemischen mit nur 20 bis 25 % Volumenanteilen Wasserstoff u. U. zu einem erheblich niedrigeren Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit der Flammensperre kommen als beim Gemisch mit einem Volumenanteil von 45 % Wasserstoff, wenn die Reaktionsfront statt aus einer L = 5000 mm langen Rohrleitung aus einer nur L = 500 mm langen Rohrleitung einläuft (siehe Kapitel 6.1). Üblicherweise wird bei

der Prüfung auf Flammendurchschlagsicherheit der Sicherung eine L = 5000 mm lange Rohrleitung mit der Nennweite der Sicherung vorgeschaltet (siehe z. B. DIN 8521, EN 730 und ISO 5175).

Bei Wasserstoff als Brenngas muß die Flammensperre beim maximalen Betriebsdruck deshalb zusätzlich bei Gemischen mit 20 bis 25 % Volumenanteilen Wasserstoff mit einer aus einer z. B. nur L = 500 mm langen Rohrleitung einlaufenden Reaktionsfront auf Flammendurchschlagsicherheit geprüft werden.

Die Nachströmsperre muß beim maximalen Betriebsdruck mit einem Nachbrand von stöchiometrischem Brenngas/Luft-Gemisch auf ein ausreichend schnelles Schließen zur Verhinderung eines Flammendurchschlages als Folge des Nachbrandes geprüft werden.

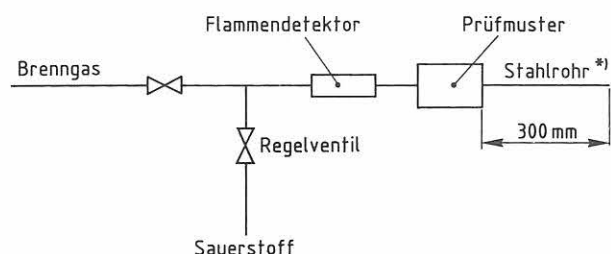
### 8.4.2 Für die Prüfung von Gebrauchsstellenvorlagen, die zur Absicherung von Gasmischern eingesetzt werden sollen

Auch hier muß die Flammensperre beim maximalen Betriebsdruck mit bei der Zündung ruhendem Gemisch auf Flammendurchschlagsicherheit geprüft werden. Dabei muß wieder das Brenngas/Sauerstoff-Gemisch mit dem größten Flammendurchschlagsvermögen durch Sperrschichten aus Sintermetall eingesetzt werden (siehe Tabelle 7).

Bei Wasserstoff als Brenngas muß die Flammensperre beim maximalen Betriebsdruck zusätzlich bei Gemischen mit 20 bis 25 % Volumenanteilen Wasserstoff mit einer aus einer z. B. nur L = 500 mm langen Rohrleitung einlaufenden Reaktionsfront auf Flammendurchschlagsicherheit geprüft werden.

Die Nachströmsperre muß beim maximalen Betriebsdruck und Volumenstrom des Gasmischers mit einem Nachbrand von stöchiometrischem Brenngas/Sauerstoff-Gemisch (Brenngas/Luft-Gemisch bei Gasmischern zur Herstellung von Brenngas/Luft-Gemischen) auf ein ausreichend schnelles Schließen zur Verhinderung eines Flammendurchschlages als Folge des Nachbrandes geprüft werden.

In den einschlägigen Normen DIN 8521, EN 730 und ISO 5175 sowie auch in der TRAC 401 wird für die Prü-



\*) Innendurchmesser der Ausgangsbohrung des Prüfmusters

Bild 42  
Prüfanordnung für temperaturgesteuerte Nachströmsperren nach DIN 8521, EN 730 und ISO 5175

fung einer temperaturgesteuerten Nachströmsperre die auf dem *Bild 42* skizzierte Prüfanordnung vorgeschlagen.

„Das Brenngasventil ist so einzustellen, daß die Flamme an der Ausgangsseite des Stahlrohres stabil ist. Das Sauerstoffventil wird langsam so weit geöffnet, bis die Flamme in das Rohr und die Einrichtung eintritt. Die Nachströmsperre muß automatisch den Gasdurchfluß absperren, bevor das stromaufwärts fließende Gas zündet.

Wird die Einrichtung im Zusammenhang mit einer Flammensperre angewendet, bedeutet „stromaufwärts fließendes Gas“ solches, daß sich stromaufwärts der Flammensperre befindet.“

Hier wird für die Prüfung der Nachströmsperre ein (Hand-) Versuch vorgeschlagen, bei dem hinsichtlich der Bedingungen nur gesagt werden kann, daß er mit einem bestimmten Brenngas im Gemisch mit Sauerstoff in stark überstöchiometrischer Zusammensetzung bei Atmosphärendruck ausgeführt worden ist. Es kann weder eine Angabe über die genaue Zusammensetzung des Brenngas/Sauerstoff-Gemisches noch über den Volumenstrom zum Zeitpunkt der Belastung der Sicherung durch den Nachbrand gemacht werden. Wie mit Hilfe einer solchen Prüfung eine konkrete Aussage über die Funktionsfähigkeit der Nachströmsperre bei einem Nachbrand gemacht werden soll, ist nicht klar, zumindest bei einer Nachströmsperre in einer Sicherheitseinrichtung zur Absicherung eines Gasmischers.

## 8.5 Schlußbemerkung zu den Prüfverfahren für die Prüfung von trockenen Gebrauchsstellenvorlagen (safety devices)

Gebrauchsstellenvorlagen zur Absicherung von Entnahmestellen sollten sinnvollerweise den im Abschnitt 8.4.1 vorgeschlagenen Prüfungen unterzogen werden. Die Anforderungen an Gebrauchsstellenvorlagen und die Vorschriften für die Bauartzulassungsprüfung von Gebrauchsstellenvorlagen für Acetylenanlagen und Calciumcarbidlager (TRAC) entsprechend geändert werden. In der DIN 8521, der EN 730 und der ISO 5175 sind nur noch die Anforderungen und die Vorschriften für die Prüfung der einzelnen Elemente der gesamten Sicherheitseinrichtung (safety device) festgelegt. Auch diese sollten entsprechend geändert werden.

Sicherheitseinrichtungen zur Absicherung eines Gasmischers gegen Flammenrückschläge vom Verbraucher her sind keine Gebrauchsstellenvorlagen im oben genannten Sinne und sollten auf der Basis von Prüfungen nach Abschnitt 8.4.2 von der Prüfstelle für den Einsatz bei den jeweils vorliegenden Einsatzbedingungen beurteilt werden.

Nach den Ergebnissen der Nachbrandversuche ist die Gebrauchsstellenvorlage Typ YZ (siehe *Bild 39*) und wahrscheinlich auch die Gebrauchsstellenvorlage Typ XY (siehe

*Bild 38*) für die Absicherung von Geräten zur elektrolytischen Zersetzung von Wasser als Gasquelle für Mikro-Löt- und Schweißgeräte gegen Flammenrückschläge vom Verbraucher her geeignet. Nach (15) wird der maximale Betriebsdruck bei diesen Geräten durch einen Druckwächter auf 1,2 bar begrenzt.

Bei Brenngas/Sauerstoff-Gemischen und höheren Anfangsdrücken können Gasmischer wahrscheinlich nur noch bedingt durch „sogenannte Gebrauchsstellenvorlagen“ gegen Flammenrückschläge vom Verbraucher her abgesichert werden. Kommt es bei größeren Volumenströmen nach dem Einlaufen der Reaktionsfront nicht zu einem Abbruch der Reaktion sondern zu einem Nachbrand, dann kann durch die Nachströmsperre in der Vorlage ein nachträglicher Flammendurchschlag möglicherweise nicht mehr verhindert werden. Da im Störfall auch mit einer solchen Belastung der Sicherung gerechnet werden muß, müssen zusätzliche konstruktive Schutzmaßnahmen getroffen werden, d. h. die Anlagenteile des Gasmischers müssen explosionsdruckstoßfest ausgelegt werden und wo dies nicht möglich ist – wie z. B. bei den Meßgeräten – müssen die Anlagenteile dann so gekammert eingebaut werden, daß Personen durch wegfliegende Teile nicht gefährdet werden können.

Diese Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes müssen aber auch schon wegen der Gefahr der Zündung der im Gasmischer erzeugten Gemische durch eine andere Zündquelle, z. B. durch elektrostatische Aufladung mitgerissener Teilchen getroffen werden.

In der ISO 5175 werden im Abschnitt 7.6.2 „Flame arrestor“ zwei Arten von Flammensperren unterschieden: Class I (heavy class) und Class II (light class). Diese Unterscheidung muß jedoch nicht beim Sicherheitselement Flammensperre sondern beim Sicherheitselement Nachströmsperre in der kombinierten Sicherheitseinrichtung aus den Einzel-elementen (safety device) gemacht werden. Beim safety device class I zur Absicherung von Gasmischern muß die Nachströmsperre beim Nachbrand von Brenngas/Sauerstoff - Gemisch und beim safety device class II zur Absicherung von Entnahmestellen muß sie beim Nachbrand von Brenngas/Luft-Gemisch einen nachträglichen Flammendurchschlag als Folge des Nachbrandes verhindern.

Bei der Prüfung des Sicherheitselementes Flammensperre auf Flammendurchschlagsicherheit beim Einlaufen einer Reaktionsfront kann auf Versuche mit strömendem Gemisch verzichtet werden. Bei der Prüfung mit ruhendem Gemisch müssen jedoch sowohl beim safety device class I als auch beim safety device class II, d. h. bei allen flame arresters in safety devices (Flammensperren in Sicherheitseinrichtungen) die Brenngas/Sauerstoff-Gemische eingesetzt werden, die das größte Flammendurchschlagsvermögen durch Sintermetallflammensperren haben. Sie sind in der Tabelle 7 zusammengestellt.

Aus sicherheitstechnischen Gründen sollten die Durchflußkurven bei Sicherheitseinrichtungen (safety devices) für brennbare Gase weiterhin auch mit dem Prüfmedium Luft

(Stickstoff) bestimmt werden können und dann mit Hilfe von Umrechnungsfaktoren auf den Durchfluß mit dem aktuellen Gas umgerechnet werden. In der Tabelle 2 sind dafür die Umrechnungsfaktoren zusammengestellt.

Für die Prüfung des Gehäuses der Sicherheitseinrichtung auf ausreichende Druckfestigkeit wird in den o. a. Normen ein Prüfdruck gefordert, der das fünffache des maximalen Betriebsdruckes beträgt. Der Prüfdruck soll aber mindestens 60 bar betragen. Bei der Reaktion von detonationsfähigen Gasphasen (Brenngas/Sauerstoff-Gemischen) treten im Gehäuse von Sicherheitseinrichtungen Explosionsdrücke auf, die wesentlich mehr als das fünffache des maximalen Betriebsdruckes betragen. Der Prüfdruck von mindestens 60 bar für die Prüfung des Gehäuses auf ausreichende Druckfestigkeit ist vermutlich vor längerer Zeit einmal bei der Erarbeitung von Prüfvorschriften für die Prüfung von Gebrauchsstellenvorlagen für Acetylen festgelegt worden. Beim Acetylen darf der Betriebsdruck maximal 2,5 bar (1,5 bar Überdruck) betragen. Man hat demnach seinerzeit bei der Festlegung des Prüfdruckes angenommen, daß im Gehäuse der Sicherheitseinrichtung Explosionsdrücke von maximal dem 25fachen des absoluten Anfangsdruckes (60 bar/2,5 bar) auftreten können. Dies ist bei den hier betrachteten Gehäuseabmessungen sicher eine wesentlich realistischere Abschätzung für den maximal möglichen Explosionsdruck (7).

Trockene Gebrauchsstellenvorlagen und Einzelflaschensicherungen (safety devices), die in die USA exportiert werden, müssen den von Underwriters Laboratories Inc. im „Outline of proposed investigation for oxygen-fuel gas combination flashback arrester and back-pressure check valve“ (20) gestellten Anforderungen genügen.

Bei der Prüfung auf Flammendurchschlagsicherheit bei einem Flammenrückschlag wird zusätzlich zu den Prüfungen nach TRAC bzw. DIN 8521, EN 730 oder ISO 5175:

1. Brenngas/Sauerstoff-Gemisch mit dem größten Flammendurchschlagsvermögen (bisher nicht bei allen Brenngasen bekannt).
2. Prüfdruck beim Acetylen von 2,5 bar (1,5 bar Überdruck) und bei den anderen Brenngasen von 3,0 oder 4,5 bar, bzw. wie vom Hersteller angegeben.
3. Länge der Vorleitung  $L = 5000$  mm noch gefordert:
4. Variation der Länge der Vorleitung  $L = 1,5$  m (5ft.), 3,0 m (10ft.) und 4,5 m (15 ft.).
5. Variation der Gemischzusammensetzung.

Während nach den deutschen (TRAC, DIN), europäischen (EN) und internationalen (ISO) Vorschriften mit dem Baumuster des Gerätes fünf Flammenrückschlagversuche unter gleichen Randbedingungen ausgeführt werden, müssen nach diesen amerikanischen Vorschriften mit dem Gerät bis zu 33 Flammenrückschlagversuche bei unterschiedlichen Randbedingungen ausgeführt werden: je ein Versuch mit drei verschiedenen Rohrlängen bei bis zu elf Gemischzusammensetzungen.

Es stellt sich die Frage, bei welchen Prüfbedingungen nach den amerikanischen Vorschriften höhere Anforderungen an die Sicherungen gestellt werden als bei den Prüfbedingungen nach den deutschen, europäischen bzw. internationalen Vorschriften.

Nur bei unterstöchiometrischen Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen kann es bei kurzen Rohrlängen und Gemischen unterhalb der Detonationsgrenze bei der Flammenrückschlagprüfung zu einem niedrigeren Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit kommen als bei langen Rohrleitungen und einem Gemisch mit 45% Volumenanteilen Wasserstoff. Damit bei diesen Gemischen der Grenzdruck noch niedriger wird, muß die Länge der Rohrleitung bei Nennweiten bis zu 10 mm aber kleiner als 1 m gewählt werden.

Die bei der oben zitierten amerikanischen Prüfvorschrift (20) geforderte Länge von  $L = 1,5$  m (5 ft.) für die Prüfrrohrleitung ist demnach wahrscheinlich deshalb gewählt worden, weil bei dieser Rohrlänge und Bedingungen an der Detonationsgrenze (stabile Detonation bei instationären Bedingungen bzw. instabile Detonation bei extrem instationären Bedingungen bei  $L = L_A = L_{krit}$ ) die mechanische Beanspruchung des Sintermetalleinsatzes wesentlich größer ist als bei der Belastung durch eine stabile Detonation bei stationären Bedingungen, d. h. bei einer Länge der Prüfrrohrleitung von 4,5 m (15 ft.). Diese stärkere mechanische Beanspruchung des Sintermetalleinsatzes wird – wie auch durch die Versuchsergebnisse angedeutet wird – zu mechanischen Beschädigungen am Einsatz führen, wenn er so in das Gehäuse eingebaut ist, daß er von innen durch die einlaufende Reaktionsfront beansprucht wird. Durch diese Prüfvorschrift wird deshalb wahrscheinlich erreicht, daß Flammendurchschlagsicherungen dieser Bauart nicht auf den Markt kommen.

Mit den höchsten mechanischen Beanspruchungen des Sintermetalleinsatzes muß nach (8) dann gerechnet werden, wenn die Sicherung etwa 80 Rohrlinnendurchmesser hinter dem Zündort in die Rohrleitung eingebaut wird und die Reaktionsfront als instabile Detonation bei extrem instationären Bedingungen in die Sicherung einläuft, d. h. wenn sie bei einer Rohrleitung mit 10 mm Innendurchmesser etwa bei  $L = 800$  mm  $= L_A = L_{krit}$  eingebaut ist und mit dem entsprechenden Gemisch geprüft wird. Ist der Sintermetalleinsatz so in das Flammensperrengehäuse eingebaut, daß er von außen durch die einlaufende Reaktionsfront beansprucht wird, dann ist er nach den Ergebnissen der ausgeführten Versuche auch bei dieser extremen Belastung noch ausreichend mechanisch fest. Allerdings sollte er auch noch so in das Sperrengehäuse eingebaut sein, daß er durch den Impuls der Detonationsfront nicht in Längsrichtung gestaucht werden kann, womit bei der auf dem Bild 4 gewählten Konstruktion für die Versuchsflammensperre, insbesondere bei Einsätzen mit geringerer Festigkeit (großen Porenweiten) und bei höheren Anfangsdrücken, gerechnet werden muß.

Damit läßt sich die oben gestellte Frage, bei welchen Prüfbedingungen nach den wesentlich umfangreicheren ame-

rikanischen Vorschriften höhere Anforderungen an trockene Gebrauchsstellenvorlagen gestellt werden als bei den Prüfbedingungen nach den deutschen, europäischen bzw. internationalen Vorschriften, wie folgt beantworten:

Es werden höhere Anforderungen an die Festigkeit der in den Geräten als Flammensperre eingesetzten Sintermetalleinsätze gestellt, wenn die nach den amerikanischen Vorschriften geforderte kürzeste Prüfröhre mit  $L = 1,5$  m Länge eingesetzt wird und die Gemischzusammensetzung bei den Brenngasgehalten bis zu der Detonationsgrenze der Gemische verändert wird. Bei trockenen Gebrauchsstellen-

vorlagen mit einem hohlzylindrischen Sintermetalleinsatz als Flammensperre kann dies allerdings nur dann zu einem mechanischen Versagen des Einsatzes und dadurch bedingt zu einem Flammendurchschlag führen, wenn der Einsatz so in das Gehäuse eingebaut ist, daß er von innen durch die einlaufende Reaktionsfront beansprucht wird.

Konstruktive Vorschriften für den Einbau von hohlzylindrischen Sintermetalleinsätzen in das Gehäuse der Vorlagen werden weder in den amerikanischen noch in den deutschen, europäischen bzw. internationalen Vorschriften gemacht.

## Literatur

- (1) Freytag, H. H.: „Handbuch der Raumexplosion“, Verlag Chemie GmbH, Weinheim 1965
- (2) Schmidt, H. und Haberl, K.: „Sicherheitsmaßnahmen gegen Acetylenzerfall bei Niederdruck-Acetylen“, Technische Überwachung (1955), Nr. 12, S. 423-429
- (3) Lietze, D.: „Grenze der Flammendurchschlagsicherheit trockener Füllkörperstrecken bei einem Acetylenzerfall“, Die Berufsgenossenschaft (1975), Nr. 3, S. 91-97
- (4) Schampel, K.: „Flammendurchschlagsicherungen“, Expert-Verlag 1988, Ehningen bei Böblingen
- (5) Lietze, D.: „Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Sperrschichten aus Bandsicherungen bei Deflagrationen und bei einem Nachbrand“, BAM-Forschungsbericht 206, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1994
- (6) Redeker, T.: „Klassifizierung explosionsfähiger Gemische anhand sicherheitstechnischer Kennzahlen“, Vortragsveranstaltung über Grundsätze der chemischen Sicherheitstechnik und ihre Anwendung in der Praxis, BAM-Bericht Oktober 1981
- (7) Lietze, D.: „Beanspruchung von Rohrleitungen bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen“, Teil 1 in Technische Überwachung Bd. 36 (1995), Nr. 6, S. 264-267 und Teil 2 in Bd. 36 (1995), Nr. 9, S. 339 - 345
- (8) Lietze, D.: „Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen im Inneren geschlossener Systeme“ BAM-Forschungsbericht 196, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1993
- (9) Lietze, D.: „Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Sperrschichten aus Bandsicherungen bei detonativ verlaufenden Reaktionen - Teil 1“, Erdöl & Kohle Erdgas Petrochemie, Bd. 47 (1994), H. 5, S. 175-184
- (10) Baumann, W. und Wagner, H. G.: „Einfluß der Frischgasströmung auf die Beschleunigung von Flammen und den Anlaufvorgang von Detonationen“, Z. Elektrochemie, Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie Bd. 65 (1961), S. 895-898
- (11) Lewis, B. und von Elbe, G.: „Combustion, Flames and Explosions of Gases“, New York, Academic Press Inc., 1951
- (12) Greene, E. F. und Toennies, J. P.: „Chemische Reaktionen in Stoßwellen“, Dietrich Steinkopff Verlag Darmstadt, 1959
- (13) Roch, K.-H. und Rost, E.: „Das Verhalten von Sinterkörpern als Flammensperren bei Detonationen von Propan/Sauerstoff-Gemischen“, Sicher ist sicher (1989) Nr. 3, S. 414-419
- (14) Rost, E. und Montebaur, M.: „Über den Einsatzbereich von Sinterkörpern bei Detonationen von Methan/Sauerstoff-Gemischen“, Sicher ist sicher (1991) Nr. 3, S. 137-140
- (15) Roch, K.-H. und Rost, E.: „Sichere Handhabung von Mikro-Löt- und Schweißgeräten“, Die Berufsgenossenschaft (1979) Nr. 12, S. 176-720
- (16) Technische Regeln für Acetylenanlagen und Calciumcarbidlager (TRAC), hier TRAC 207 „Sicherheitseinrichtungen“ und TRAC 401 „Richtlinien für die Prüfung von Acetylenanlagen durch Sachverständige (Prüfrichtlinien)“

- (17) DIN 8521, Entwurf April 1992 „Einrichtungen für Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren – Sicherheitseinrichtungen für Brenngase und Sauerstoff oder Druckluft – Allgemeine Festlegungen, Anforderungen und Prüfungen (Vorschlag für eine europäische Norm)
- (18) EN 730, 1995 „Equipment for gas welding, cutting and allied processes – Safety devices for fuel-gases and oxygen or compressed air – General specifications, requirements and tests
- (19) ISO 5175, Ausgabe Sept. 1987 „Equipment used in welding, cutting and allied processes – Safety devices for fuel-gases and oxygen or compressed air – General specifications, requirements and tests“
- (20) „Outline of proposed investigation for oxygen-fuelgas combination flashback arrester and back-pressure check valve“, Underwriters Laboratories Inc. Subj. 1357, Nov. 1990

# Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968

**Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)**

Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/1970 (vergriffen)

G. Andreas

**Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern**

Nr. 3/1970

J. Ziebs

**Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile**

Nr. 4/1970 (vergriffen)

A. Burmester

**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren**

Nr. 5/1971

N. Steiner

**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**

Nr. 6/1971

P. Schneider

**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**

Nr. 7/1971

H.-J. Petrowitz

**Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**

Nr. 8/1971

H. Veith

**Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**

Nr. 9/1971

K.-H. Möller

**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**

Nr. 10/1972

D. Aurich, E. Martin

**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**

Nr. 11/1972

H.-J. Krause

**Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden**

Nr. 12/1972

H. Feuerberg

**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**

Nr. 13/1972

K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer  
**Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und  $2 \cdot 10^{-7}$  Torr**

Nr. 14/1972

E. Fischer

**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz**

Nr. 15/1972

H. Pohl

**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**

Nr. 16/1972

E. Knublauch

**Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102 Blatt 2 im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadenfeuer**

Nr. 17/1972

P. Reimers

**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**

Nr. 18/1973

W. Struck

**Das Sprödbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 19/1973

K. Kaffanke, H. Czichos

**Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**

Nr. 20/1973

R. Rudolphi

**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**

Nr. 21/1973

D. Klaffke, W. Maennig

**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung**

Nr. 22/1973

R. Rudolphi, E. Knublauch

**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**

Nr. 23/1973

W. Ruske

**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin. Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**

Nr. 24/1973

J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi

**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**

Nr. 25/1973

E. Knublauch

**Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen**

Nr. 26/1974

P. Jost, P. Reimers, P. Weise

**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen**

Nr. 27/1974

H. Wüstenberg

**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**

Nr. 28/1974

H. Heinrich

**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**

Nr. 29/1974

P. Schneider

**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem Idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall**

Nr. 30/1974 (vergriffen)

H. Czichos, G. Salomon

**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**

Nr. 31/1975

G. Fuhrmann

**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung**

Nr. 32/1975

R. Rudolphi, B. Böttcher

**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**

Nr. 33/1975

A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi

**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens**

Nr. 34/1976 (vergriffen)

H.-J. Deppe

**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff**

Nr. 35/1976

E. Limberger

**Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren**

Nr. 36/1976 (vergriffen)

J. Hundt

**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**

Nr. 37/1976

W. Struck

**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren**

Nr. 38/1976

K.-H. Habig

**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4**

Nr. 39/1976

K. Kirschke, G. Kempf

**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit Nicht-Newton'schem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Schwerbeanspruchung**

Nr. 40/1976

H. Hantsche

**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**

Nr. 41/1976

B. Böttcher

**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**

Nr. 42/1976

S. Diellen

**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**

Nr. 43/1976

W. Struck

**Das Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 44/1976

W. Mathees

**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms "Stab-Werk"**

Nr. 45/1976

W. Paatsch

**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**

Nr. 46/1977 (vergriffen)

G. Schickert, H. Winkler

**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung (Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses)**



- Nr. 47/1977  
A. Plank  
**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**
- Nr. 48/1977  
U. Holzlöhner  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**
- Nr. 49/1977  
G. Wittig  
**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**
- Nr. 50/1978 (vergriffen)  
N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiera, G. Andreae, W. Markowski  
**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und Überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**
- Nr. 51/1978  
J. Sickfeld  
**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen**
- Nr. 52/1978  
A. Tomov  
**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung**
- Nr. 53/1978  
R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi  
**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**
- Nr. 54/1978  
H. Sander  
**Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 55/1978  
D. Klaffke  
**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristalle polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**
- Nr. 56/1979  
W. Brünner, C. Langlie  
**Stabilität von Sandwichbauteilen**
- Nr. 57/1979  
M. Stadthaus  
**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetspulverprüfung (Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing)**
- Nr. 58/1979  
W. Struck  
**Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau**
- Nr. 59/1979  
G. Plauk  
**Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl**
- Nr. 60/1979  
H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs  
**Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken**
- Nr. 61/1979  
K. Richter  
**Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems**
- Nr. 62/1979  
W. Gerisch, G. Becker  
**Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle**
- Nr. 63/1979  
E. Behrend, J. Ludwig  
**Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase**
- Nr. 64/1980  
W. Rücker  
**Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung**
- Nr. 65/1980  
P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs  
**Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte**
- Nr. 66/1980  
M. Hattwig  
**Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung**
- Nr. 67/1980  
W. Matthees  
**Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung**
- Nr. 68/1980  
D. Petersohn  
**Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik — Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers**
- Nr. 69/1980  
F. Buchhardt, P. Brandl  
**Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitshüllen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise**
- Nr. 70/1980 (vergriffen)  
G. Schickert  
**Schwellenwerte beim Betondruckversuch**
- Nr. 71/1980  
W. Matthees, G. Magiera  
**Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen**
- Nr. 72/1980  
R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen**
- Nr. 73/1980  
P. Wegener  
**Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen**
- Nr. 74/1980  
R. Rudolphi, R. Müller  
**ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz**
- Nr. 75/1980  
H.-J. Heinrich  
**Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen**
- Nr. 76/1980  
D. Klaffke, W.-W. Maennig  
**Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop**
- Nr. 77/1981  
M. Gierloff, M. Maultzsch  
**Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen**
- Nr. 78/1981  
W. Rücker  
**Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund**
- Nr. 79/1981  
V. Neumann  
**Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflußten Kaltrißneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch**
- Nr. 80/1981  
A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch  
**Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten**
- Nr. 81/1981  
J. Schmidt  
**Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik**
- Nr. 82/1982  
R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworuski  
**Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches (Assesment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test)**
- Nr. 83/1982  
H. Czichos, P. Feinle  
**Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen**
- Nr. 84/1982  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)**
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/1982  
H. Czichos  
**Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm "Basic Technological Research"**
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982  
K. Niesel, P. Schimmelwitz  
**Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale**
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982  
B. Isecke, W. Stichel  
**Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren**
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983  
A. Erhard  
**Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall**
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983  
D. Conrad, S. Dietlen  
**Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid**
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members)**
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983  
M. Weber  
**Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz**
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983  
L. Auersch  
**Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden**

- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983  
P. Studt  
**Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen**
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983  
Xian-Quan Dong  
**Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen**
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983  
M. Römer  
**Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten**
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983  
H. Eißler  
**Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken**
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983  
G. Fuhrmann, W. Schwarz  
**Typische Bruchflächenausbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung**
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983  
E. Schnabel  
**Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren — Stretch- und Erholungsvermögen**
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members)**
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984  
G. Klamrowski, P. Neustupny  
**Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand**
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984  
P. Reimers, J. Goebbels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding  
**Röntgen- und Gammastrahlen-Computer-Tomographie**
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984  
G. Magiera  
**Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens auf Druckspannungsmessung in Beton**
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984  
D. Schmitger  
**Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien**
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984  
M. Gierloff  
**Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen**
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984  
B. Schulz-Forberg  
**Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen**
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984  
J. Lehnert  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last**
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984  
W. Stichel, J. Ehreke  
**Korrosion von Stahlradiatoren**
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984  
L. Auersch  
**Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen**
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985  
M. Omar  
**Zur Wirkung der Schrumpfbegrenzung auf den Schweißspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulverschweißten Blechen aus St E 460 N**
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985  
H. Walde, B. Kropp  
**Wasserstoff als Energieträger**
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985  
K. Ziegler  
**Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte**
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985  
W. Lützow  
**Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen**
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985  
R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito  
**Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen**
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985  
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit  
**Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen**
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985  
K. Richter  
**Farbempfindungsmerkmal Elementarblau und Buntheitabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld**
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi, A. Wagner  
**Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik**
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985  
H. Czichos, G. Sievers  
**Materials Technologies and Techno-Economic Development — A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985  
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler  
**Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung — Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen**
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985  
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I)**
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986  
A. Hecht  
**Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung**
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986  
P. Feinle, K.-H. Habig  
**Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen; Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung**
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986  
J. Mischke  
**Entsorgung kerntechnischer Anlagen Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste**
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986  
D. Frennoch  
**Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase**
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986  
H.-M. Thomas  
**Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung**
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)  
B. Droste, U. Probst  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986  
W. Stichel  
**Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen**
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I)**
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbalken, Teil II (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II)**
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1986 (vergriffen)  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit (Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load — Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates)**
- Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986  
W. Struck  
**Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material**
- Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II (Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load — Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II)**
- Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987  
Chr. Herold, F.-U. Vogdt  
**Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen**
- Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)  
M. Woydt, K.-H. Habig  
**Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe**
- Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987  
G. Andreae, G. Niessen  
**Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen**
- Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987  
J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich  
**Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen**
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987  
H.-J. Deppe, K. Schmidt  
**Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau**

- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit**
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987  
M. Dogunke, F. Buchhardt  
**Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben**
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987  
J. Olschewski, S.-P. Scholz  
**Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle**
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members)**
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987  
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak  
**Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken**
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987  
H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann  
**Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefährzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen**
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Experimental und numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load)**
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987  
F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes  
**Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR- Reaktorgebäudes**
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987  
U. Holzlöhner  
**Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden**
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/1987  
W. Schon, M. Mallon  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987  
H.-D. Kleinschrodt  
**Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen**
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988  
W. Müller  
**Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand**
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988  
U. Holzlöhner  
**Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben**
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988  
M. Weber  
**VG3D — Zeichenprogramm für vektographische Darstellung dreidimensionaler Strukturen**
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988  
L. Auersch-Saworski  
**Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund, insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen**
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988  
G. Plauk, G. Kretschmann, R.-G. Rohrmann  
**Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn**
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988  
H. Sander, W.-W. Maennig  
**Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988  
K. Breikreutz, P.-J. Uttech, K. Haedecke  
**Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie**
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988  
L. Auersch  
**Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrerschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental**
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989  
G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt  
**Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen**
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989  
E. Limberger, K. Brandes  
**Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung**
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989  
R. Wäsche, K.-H. Habig  
**Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung — Literaturübersicht**
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6**
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989  
W. Matthees  
**Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten**
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989  
G. Mellmann, M. Maultzsch  
**Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989  
W. Brünner  
**Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben**
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989  
W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck  
**Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989  
R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork  
**Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger**
- Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989  
P. Göbel, L. Meckel, W. Schiller  
**Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-Emission — Teil B: Textilien**
- Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989  
K. Breikreutz  
**Modelle für Stereologische Analysen**
- Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989  
A. Mitakidis, W. Rücker  
**Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum bei transienten Belastungsvorgängen**
- Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi  
**Numerische Untersuchung geometriebedingter Wärmebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hochauflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels**
- Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990  
Chr. Kohl, W. Rucker  
**Integration der Untergrunddynamik in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)**
- Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990  
P. Studt, W. Kerner, Tin Win  
**Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgender Emulsionen**
- Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990  
F. Buchhardt  
**Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dynamischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung**
- Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990  
J. Vielhaber, G. Plauk  
**Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen**
- Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990  
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg  
**Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequenzen für die Beförderung gefährlicher Güter**
- Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte**
- Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990  
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski  
**Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-plastischen Bruchmechanik**
- Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990  
W. Matthees, G. Magiera  
**Iterative Dekonvolution der seismischen Basiserregung für den Zeitraum**
- Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991  
G. Schickert, M. Krause, H. Wiggerhauser  
**Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Ingenieurbauwerken**
- Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991  
G. Andraea, J. Knapp, G. Niessen  
**Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatztemperaturen bis ca. 1000 °C**
- Nr. 179/ISBN 3-89429-100-1/1991  
H. Eifler  
**Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente**
- Nr. 180/ISBN 3-89429-101-X/1991  
E. Klement, G. Wieser  
**Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten**
- Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991  
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow  
**Industrial and Materials Technologies Research and Development Trends and Needs**

- Nr. 182/ISBN 3-89429-145-1/1992  
M. Weber  
**Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich geometriebedingter Wärmebrücken**
- Nr. 183/ISBN 3-89429-163-X/1992  
F. Buchhardt  
**Zur Dekonvolution im Zeitbereich**
- Nr. 184/ISBN 3-89429-164-8/1992  
M. Maultzsch, W. Stichel, E.-M. Vater  
**Feldversuche zur Einwirkung von Aufbaumitteln auf Verkehrsbauteile (im Rahmen des Großversuchs "Umweltfreundlicheres Streusalz")**
- Nr. 185/ISBN 3-89429-165-6/1992  
Renate Müller  
**Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestimmung thermischer Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen — Anwendung auf das Heißdraht-Parallelverfahren und auf Versuche an Hausschornsteinen**
- Nr. 186/ISBN 3-89429-211-3/1992  
B. Löffelbein, M. Woydt, K.-H. Habig  
**Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Gleitpaarungen aus Ingenieurkeramischen Werkstoffen in wässrigen Lösungen**
- Nr. 187/ISBN 3-89429-216-4/1992  
Th. Schneider, E. Santner  
**Mikrotribologie: Stand der Forschung und Anwendungsmöglichkeiten — Literaturübersicht**
- Nr. 188/ISBN 3-89429-243-1/1992  
K. Mallwitz  
**Verfahren zur Vorausermittlung der Setzung von Fundamenten auf geständerten Strecken infolge zyklischer Beanspruchung**
- Nr. 189/ISBN 3-89429-244-X/1992  
W. Matthees, G. Magiera  
**Impedanzeigenschaften von Finiten-Elemente-Modellen bei Integration im Zeitraum**
- Nr. 190/ISBN 3-89429-245-8/1992  
G. Zachariev  
**Untersuchung des Versagens thermoplastischer Kunststoffe im Kurzzeit-Zugversuch und Retardations-Zugversuch**
- Nr. 191/ISBN 3-89429-246-6/1992  
H.-M. Bock, S. Erbay, J. With  
**Kritische Stahltemperatur als charakteristischer Kennwert für die Feuerwiderstandsdauer von Bauwerkssystemen aus Stahl**
- Nr. 192/ISBN 3-89429-329-2/1993  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte — Lokales Rißwachstum, Ermittlung des Rißwiderstandsverhaltens aus der Kerbschlagarbeit**
- Nr. 193/3-89429-291-1/1993  
W. Gerisch, Th. Fritz, S. Steinborn  
**Statistical Consulting in the Frame of VAMAS. The Role of the Technical Working Arfea/Advisory Group. Statistical Techniques for Interlaboratory Studies and Related Projects (VAMAS Report No. 13)**
- Nr. 194/ISBN 3-89429-330-6/1993  
U. Krause  
**Ein Beitrag zur mathematischen Modellierung des Ablaufs von Explosionen**
- Nr. 195/ISBN 3-89429-331-4/1993  
U. Schmidtchen, G. Würsig  
**Lagerung und Seetransport großer Mengen flüssigen Wasserstoffs am Beispiel des "Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Projekts. Überblick über die in Deutschland anzuwendenden Gesetze, Verordnungen und technischen Regeln**
- Nr. 196/ISBN 3-89429-362-4/1993  
D. Lietze  
**Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen im Innern geschlossener Systeme**
- Nr. 197/ISBN 3-89429-400-0/1993  
A. Skopp  
**Tribologisches Verhalten von Siliziumnitridwerkstoffen bei Festkörpergleitreibung zwischen 22 °C und 1000 °C**
- Nr. 198/ISBN 3-89429-421-3/1994  
St. Meretz  
**Ein Beitrag zur Mikromechanik der Interphase in polymeren Faserverbundwerkstoffen**
- Nr. 199/ISBN 3-89429-422-1/1994  
W. F. Rücker, S. Said  
**Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahntunneln und dicht benachbarten Gebäuden**
- Nr. 200/ISBN 3-89429-423-X/1994  
D. Arndt, K. Borchardt, P. Croy, E. Geyer, J. Henschen, C. Maierhofer, M. Niedack-Nad, M. Rudolph, D. Schaurich, F. Weise, H. Wiggenhauser  
**Anwendung und Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Bestimmung der Mauerwerksfeuchte im Deutschen Dom**
- Nr. 201/ISBN 3-89429-475-2/1994  
U. Holzlöhner, H. August, T. Meggyes, M. Brune  
**Deponieabdichtungssysteme — Statusbericht**
- Nr. 202/ISBN 3-89429-481-7/1994  
J. Schmidt  
**Über eine Verteilungsfunktion mit Parametern für Median, Spannweite, Schiefe und Wölbung — Konzept und Anwendung**
- Nr. 203/ISBN 3-89429-483-3/1994  
B. Schulz-Forberg, J. Ludwig  
**Sicherheitsniveaus von Transporttanks für Gefahrgut**
- Nr. 204/ISBN 3-89429-484-1/1994  
W. Struck, E. Limberger  
**Der Glaskugelsack als Prüfkörper für Beanspruchungen durch weichen Stoß — eine erweiterte Modellvorstellung**
- Nr. 205/ISBN 3-89429-516-3/1995  
P. Rose  
**Bestimmung charakteristischer Fehlermerkmale zur rechnergestützten Bildauswertung von Schweißnahradiographien**
- Nr. 206/ISBN 3-89429-517-1/1995  
D. Lietze  
**Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Sperrschichten aus Bandsicherungen bei Deflagrationen und bei einem Nachbrand**
- Nr. 207/ISBN 3-89429-593-7/1995  
W. Daum  
**Zur objektiven Beurteilung der Bildqualität industrieller Radioskopiesysteme**
- Nr. 208/ISBN 3-89429-557-0/1995  
G. Kalinka  
**Ein Beitrag zur Kristallisation gefüllter und ungefüllter Thermoplaste**
- Nr. 209/ISBN 3-89429-594-5/1995  
D. Hoffmann, K. Niesel  
**Zur Quantifizierung des Effekts von Luftverunreinigungen auf Putzmörtel**
- Nr. 210/ISBN 3-89429-595-3/1995  
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera  
**Zur Erfassung der hysteretischen Dämpfung im Zeitraum**
- Nr. 211/ISBN 3-89429-973-8/1997  
G. Meier zu Köcker, K.-H. Habig  
**Steigerung der Lebensdauer und der Prozeßsicherheit durch beschichtungsgerechte Fertigung von Werkzeugen und Bauteilen**
- Nr. 212/ISBN 3-89429-974-6/1996  
S. Dähne  
**Analytische Grundlagenuntersuchungen zur Laserimpulsfluorometrie im ultravioletten Spektralbereich**
- Nr. 213/ISBN 3-89429-975-4/1995  
J. Kelm  
**High Resolution NMR Spectroscopy for the Determination of Elastomers, Blends and Thermoplastic Elastomers — Carbon and Proton NMR Spectra Catalogue**
- Nr. 214/ISBN 3-89429-976-2/1995  
J. Moll  
**Exciton-Dynamics in J-Aggregates of an Organic Dye**
- Nr. 215/ISBN 3-89429-950-9/1995  
W. Müller u. a.  
**Modellhafte Untersuchungen zu Umweltschädigungen in Innenräumen anhand des Grünen Gebäudes**
- Nr. 216/ISBN 3-89429-774-3/1997  
C.-P. Bork, J. Hünecke, M. Golmann  
**Neue Stähle mit hoher statischer, dynamischer und Dauerfestigkeit für den Automobilbau**
- Nr. 217/ISBN 3-89429-775-1/1997  
W. Müller, M. Torge, D. Kruschke, K. Adam  
**Sicherung, Konservierung und Restaurierung historischer Glasmalereien**
- Nr. 218/ISBN 3-89429-776-X/1997  
S. Steinborn  
**Analyse von Verformung und Rißbildung bei Straßenbelägen durch Finite-Elemente-Methoden**
- Nr. 219/ISBN 3-89429-777-8/1997  
G. Fuhrmann, J. Bohse, H.-V. Rudolph  
**Schwingfestigkeit von Thermoplasten und Verbundwerkstoffen bei Umlaufbiegung**
- Nr. 220/ISBN 3-89429-778-6/1997  
D. Lietze  
**Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Sperrschichten aus Sintermetall**



